VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

ББК 31.261.6
К 89

УДК 621.313.13.019.3

Рецензенты:
А. П. Варакса, кандидат технических наук;
Н. И. Шустал, начальник лаборатории автоматики и телемеханики Минского часового завода

Кузнецов Б. В.

К 89 Выбор электродвигателей к производственным механизмам.— Мн.: Беларусь, 1984.— 80 с., черт.— (Б-чка электромонтера).

25 к.

Приводятся характеристики электродвигателей для наиболее распространенных машин и механизмов, а также методика их выбора для обеспечения заданной производительности, надежности и экономичности. Расчеты иллюстрируются примерами из практики промышленных предприятий.

Предназначена для электромонтеров и электротехников.

К $\frac{2302030000-236}{М301(05)-84}$ 91—84 ББК 31.261.6

© Издательство «Беларусь», 1984

ОБЩИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Основой электропривода является электрический двигатель. Соответствие его конструктивных, механических и энергетических параметров условиям работы производственного механизма обеспечивает заданную производительность, качество продукции, надежность и экономичность.

При выборе электродвигателя для рабочей машины приходится решать широкий круг вопросов, а именно рассчитать его мощность, выбрать род тока, напряжение, угловую скорость, конструктивное исполнение электродвигателя. Для этого необходимо знать условия работы электрифицируемой машины, которые должны быть сформулированы в задании на проектирование.

Кинематическая схема и даже конструкция машинного устройства в значительной степени определяются типом примененного электропривода, который, с одной стороны, сам зависит от свойств рабочей машины, а с другой — влияет на ее конструктивные особенности. В связи с этим проектирование электропривода осуществляется параллельно с проектированием рабочей машины в самой начальной стадии.

В производственных условиях при эксплуатации электроприводов необходимость выбора электродвигателя чаще всего возникает при замене слабозагруженных асинхронных электродвигателей, модернизации оборудования, изменении технологического процесса. Здесь приходится решать значительно меньше задач, чем при проектировании электропривода, однако требуются знания и навыки по определению оптимальных нагрузок, пусковых свойств и перегрузочных способностей электродвигателя.

НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Номинальными данными электродвигателя называются величины, указанные на его заводском щитке и ха-

рактеризующие номинальный режим его работы, например мощность, напряжение, ток, частоту вращения.

Номинальной мощностью электродвигателя называется полезная механическая мощность на его валу, выраженная в ваттах (Вт), киловаттах (кВт) или мегаваттах (мВт).

Номинальное напряжение (В, кВ) и **номинальный ток** (А, кА) электрической машины соответствуют номинальному режиму ее работы. Номинальным напряжением трехфазной электрической машины называется междуфазное (линейное) напряжение ее, а номинальным напряжением ротора асинхронного электродвигателя с контактными кольцами — напряжение разомкнутой обмотки ротора между контактными кольцами в неподвижном его состоянии при включенной на номинальное напряжение обмотке статора.

Нагрузкой электродвигателя называется мощность, которую он развивает в данный момент времени. Она выражается в ваттах, киловаттах или мегаваттах либо в процентах или долях номинальной мощности. Если нагрузка равна номинальной мощности, то она называется **номинальной.**

Нагрузка может быть задана током, потребляемым электродвигателем в данный момент, и тогда она выражается в амперах, процентах или в долях номинального тока.

Ряд номинальных величин, которые не указаны на заводском щитке электродвигателя, но также характеризуют номинальный режим его работы, можно определить по формулам:

номинальный момент на валу (Н · м)

$$M_н \approx P_н \cdot 10^4/n_н \text{ или } M_н = P_н \cdot 10^3/\omega_н,$$

где $P_н$ — номинальная мощность на валу электродвигателя, кВт; $n_н$ — номинальная частота вращения, об/мин (мин$^{-1}$); $\omega_н = 2\pi n_н/60$ — номинальная угловая скорость, рад/с;

номинальное скольжение трехфазного асинхронного электродвигателя

$$s_н = (n_c - n_н)/n_н \text{ или } s_н = (\omega_c - \omega_н)/\omega_c,$$

где $n_c = 60f/p$ — частота вращения магнитного поля статора (или синхронная частота), об/мин; f — частота сети переменного тока, Гц; p — число пар полюсов магнитного поля статора (указывается на щитке машины в обозначении типа электродвигателя, например 4А90L6У3, где цифра 6 соответствует числу полюсов); ω_c — синхронная угловая скорость электродвигателя, рад/с;

номинальная активная мощность, потребляемая из сети трехфазным асинхронным электродвигателем (кВт),

$$P_{1н} = \sqrt{3}\, U_н I_н \cos\varphi_н \cdot 10^3,$$

где $U_н$ — номинальное напряжение, В; $I_н$ — номинальный ток, А; $\cos\varphi_н$ — номинальный коэффициент мощности. Соответственно потребляемая реактивная $Q_{1н}$ (квар) и полная $S_{1н}$ (кажущаяся) мощность (кВ · А)

$$Q_{1н} = \sqrt{3}\, U_н I_н \sin\varphi_н \cdot 10^3 \text{ или}$$

$$Q_{1н} = P_н \operatorname{tg}\varphi_н/\eta_н,$$

где $\sin\varphi_н$, $\operatorname{tg}\varphi_н$ — синус и тангенс угла сдвига фаз, соответствующие номинальной величине коэффициента мощности; $\eta_н$ — номинальный КПД;

$$S_{1н} = \sqrt{3}\, U_н I_н \cdot 10^3.$$

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Исполнение электродвигателей по способу монтажа. В единых сериях электродвигателей общего назначения применяются различные формы их исполнения по способу монтажа, что обусловлено размерами электромашины, ее конструкцией, степенью защиты, высотой оси вращения и т. д.

Формы исполнения электродвигателей по способу монтажа и их условное обозначение установлены стандартом СЭВ (СТ СЭВ 246—76). В обозначение входят буквы IM и четыре цифры, первая из которых определяет группу (от 1 до 9), а остальные — способ монтажа и форму конца вала. Наиболее распространенными являются следующие группы конструктивного исполнения: 1 — электродвигатели на лапах с подшипниковыми щитами; 2 — то же с фланцем на одном щите; 3 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном щите.

Обозначение конца вала, т. е. части его, выступающей за подшипник: 0 — без конца вала; 1 — с одним цилин-

дрическим концом; 2 — с двумя цилиндрическими концами и т. д.

Например, условное обозначение машины IM1001 расшифровывается таким образом: машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и горизонтальным валом, конец вала — цилиндрический; IM1011 — машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и вертикальным валом, конец вала — цилиндрический, направлен вниз; IM3001 — машина без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обеих сторон, с горизонтальным расположением вала, конец вала — цилиндрический.

Исполнение электродвигателей по степени защиты. Различают исполнение по степени защиты от попадания внутрь машины посторонних предметов и от возможного соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими и вращающимися частями, находящимися внутри машины. ГОСТ 14254—69 устанавливает обозначение исполнений, состоящее из двух букв IP и двух цифр, первая из которых (от 0 до 6) характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими частями, находящимися внутри машины, а вторая (от 0 до 8) — степень защиты самой машины от проникновения в нее влаги.

Наиболее распространенными исполнениями по степени защиты являются машины IP22 и IP24. Они соответствуют защите от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины пальцев человека и твердых предметов диаметром более 12,5 мм (первая цифра 2), а также защите от попадания в машину капель воды. Исполнение IP22 предусматривает защиту от проникновения внутрь машины капель, падающих под углом не более 15° к вертикали, а исполнение IP23 — под углом не более 60° к вертикали. Машины исполнения IP22 и IP23 называются каплезащищенными (по старой терминологии).

Машины исполнения IP44 защищены от соприкосновения инструментов, проволоки или других подобных предметов, толщина которых не превышает 1 мм, с токоведущими частями, а также от попадания внутрь машины предметов диаметром более 1 мм (первая цифра). Вторая цифра обозначает, что машина защищена от попадания внутрь корпуса водяных брызг любого направления. Такие машины называются также закрытыми.

Обозначение способов охлаждения электрических машин (ГОСТ 2059—75) состоит из латинских букв IC, характеризующих цепь охлаждения; прописной буквы, обозначающей вид хладагента (воздух — A, водород — H, вода — W и т. д.), и двух цифр. Первая цифра означает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ его перемещения. Если хладагентом является воздух, то буква опускается. Если машина имеет две и более цепи охлаждения, то в обозначении указываются цифровые характеристики всех цепей, начиная с цепи со вторичным хладагентом (с более низкой температурой). Поэтому в обозначении машин с воздушным хладагентом могут быть четыре буквы, две из которых (например, для закрытых машин) характеризуют внешнюю цепь охлаждения и две — внутреннюю (табл. 1).

1. Способы охлаждения электродвигателей в зависимости от высоты оси вращения и исполнения по степени защиты

Вид электродвигателя	Исполнение по степени защиты	Высота оси вращения h, мм	Способ охлаждения
Асинхронные	IP23	560—1600	IC01
	IP44	50—355	IC17
	IP44	400—630	IC0161
Постоянного тока	IP23	80—315	IC01
	IP22	355—560	IC17
	IP44	80—200	IC0141
	IP44	132—200	IC0141
	IP44	225—500	IC37

Для специальных целей выпускаются электродвигатели с более высокой степенью защиты, например IP57. В этом исполнении машина защищена от попадания внутрь корпуса пыли и может работать даже при погружении в воду.

Исполнение электродвигателей по способу вентиляции. Данный вид исполнения предусматривает ту или иную систему вентиляции, расположение вентилятора и систему забора охлаждающего воздуха. Например, два наиболее распространенных в настоящее время исполнения по степени защиты IP23 (или IP22 для электродви-

гателей постоянного тока) и IP44 связаны определенным образом с системами вентиляции и способами охлаждения. Исполнение по степени защиты IP23 (или IP22) включает машины с внутренней самовентиляцией и продувом воздуха. При этом вентилятор располагается на валу машины, а воздух, проходя внутри корпуса, охлаждает обмотки и сердечники. Исполнение по степени защиты IP23 имеет радиальную систему вентиляции, а IP22 — аксиальную (осевую).

Машины исполнения IP44 с самовентиляцией имеют наружный обдув. Охлаждающий воздух направляется вдоль наружной поверхности корпуса с помощью вентилятора, установленного вне корпуса на выступающем конце вала. Выпускаются также машины этого исполнения с независимой вентиляцией, где охлаждающий воздух поступает от отдельного пристроенного вентилятора.

Исполнение электродвигателей по воздействию климатических факторов. Исполнение электродвигателей для различных климатических районов, их категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования при воздействии климатических факторов среды установлены ГОСТ 15150—69 и 15143—70. Например, исполнение электродвигателей, предназначенных для эксплуатации на суше, реках или озерах в макроклиматических районах с умеренным климатом, обозначается буквой У, с холодным климатом — буквами ХЛ, с влажным тропическим климатом — буквами ТВ, во всех климатических районах на суше (общеклиматическое исполнение) — буквой О.

Категория размещения электродвигателей обозначается цифрой (от 1 до 5), следующей за буквами. Исполнение электродвигателей, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, обозначается цифрой 1; в закрытом помещении, где температура и влажность несущественно отличаются от наружного воздуха,— цифрой 2; в закрытом помещении, в котором температура и влажность, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе,— цифрой 3; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых помещениях,— цифрой 4; в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды, например в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях,— цифрой 5.

Электродвигатели общего назначения, к которым не предъявляются какие-либо дополнительные требования, имеют исполнение У3 или У4, т. е. они могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях категории 3 или 4.

ОСНОВНЫЕ СЕРИИ И ТИПОРАЗМЕРЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Электродвигатели переменного и постоянного тока общепромышленного исполнения выпускаются в виде единых серий, объединенных общностью расчета, конструкции и технологии производства. Каждая серия имеет свои шкалы мощностей и единую увязку с установочными и присоединительными размерами. Это позволяет изготавливать электродвигатели на основе широкой унификации деталей, способствует внедрению прогрессивных технологических процессов, повышению надежности и улучшению технико-экономических показателей двигателей.

Асинхронные электродвигатели. На долю этих двигателей приходится свыше 40 % вырабатываемой в стране электроэнергии. На их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов: обмоточной меди, изоляционных материалов, электротехнической стали и других. Поэтому создание серий высокоэкономичных и надежных электродвигателей является важнейшей народнохозяйственной задачей, а правильный их выбор, эксплуатация и ремонт играют большую роль в экономии материальных и трудовых ресурсов.

До недавнего времени выпускались асинхронные электродвигатели серий А и А0 мощностью от 0,6 до 100 кВт. Теперь они заменены более совершенными сериями А2 и 0А2 с тем же диапазоном мощностей.

В настоящее время промышленность выпускает трехфазные асинхронные электродвигатели серий 4А (закрытые обдуваемые) и 4АН (защищенные). По сравнению с электродвигателями серии А2 при их производстве экономится 24 % электротехнической стали, 25 % обмоточной меди, 20 % чугунного литья, 10 % алюминия, 30 % стального проката. Масса электродвигателей снижается на 22 %.

Электродвигатели этой серии на напряжение до 1000 В включают в себя основные исполнения и модифи-

кации: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные, с фазным ротором, со встроенным электромагнитным тормозом, малошумные; специализированные исполнения исходя из условий окружающей среды: тропическое, химически стойкое, для холодного климата, для сельского хозяйства.

Серия 4А охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт (при 1500 об/мин), имеет 17 высот оси вращения от 50 до 355 мм.

Электродвигатели этой серии изготовляются на следующие номинальные напряжения (основное исполнение):

напряжение, В	220, 380	220, 380, 660	220/380 380/660	380/660
мощность, кВт	0,06—0,37	0,55—13	15,0—110	132—400

Принята новая система обозначения типоразмеров электродвигателей серии 4А (ГОСТ 19523—74): 4 — номер серии; А — тип (асинхронный); Н — защищенное исполнение; отсутствие буквы — закрытое, обдуваемое; К — ротор фазный; отсутствие буквы — ротор короткозамкнутый; А — станина и щиты алюминиевые; Х — станина алюминиевая, щиты чугунные; отсутствие буквы — станина и щиты чугунные или стальные; две или три цифры — высота оси вращения; S, M, L — установочный размер по длине станины (меньший, средний, больший); А и В — меньшая и большая длина сердечника при определенном установочном размере; отсутствие буквы — при данном установочном размере выполняются сердечники только одной длины; одна или две цифры — число полюсов; У — климатическое исполнение; 3 — категория размещения по ГОСТ 15150—69.

Примеры обозначения электродвигателей: 4А180М4У3 — трехфазный асинхронный, 4-й серии, закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором, с чугунными станиной и щитами, высотой оси вращения 180 мм, средним (М) установочным размером по длине станины, четырехполюсный, климатическое исполнение У (умеренный климат), категория размещения 3; 4АН315S10У3 — трехфазный асинхронный, 4-й серии, защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором, со стальными станиной и щитами, высотой оси вращения

315 мм, меньшим (S) установочным размером, десятиполюсный, климатическое исполнение У, категория размещения 3; 4АНК315S10У3 — то же, что и в предыдущем примере, но с фазным ротором. В обозначение встраиваемых электродвигателей после серии добавляется буква В, например 4АВ180А6У3.

Увязка номинальных мощностей с установочными размерами в зависимости от степени защиты и числа полюсов для электродвигателей основного исполнения определена ГОСТ 19583—81 (табл. 2 и 3).

Асинхронные электродвигатели выпускаются двух конструктивных типов: с короткозамкнутым и фазным ротором. Преимущественное применение имеют электродвигатели с короткозамкнутым ротором, как более дешевые в производстве и надежные в эксплуатации. Основной их недостаток — отсутствие экономичного способа плавного регулирования частоты вращения.

2. Шкала мощностей асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А, со степенью защиты IP44, основного исполнения, кВт

Высота оси вращения *h*, мм	Условная длина станины	Синхронная частота вращения, об/мин					
		3000	1500	1000	750	600	500
1	2	3	4	5	6	7	8
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—
90	L	3,0	2,2	1,5	0,75	—	—
	B	—	—	—	1,1	—	—
100	S	4,0	3,0	—	—	—	—
	L	5,5	4,0	2,2	1,5	—	—
112	M	7,5	5,5	3,0	2,2	—	—
	B	—	—	4,0	3,0	—	—
132	S	—	7,5	5,5	4,0	—	—
	M	11,0	11,0	7,5	5,5	—	—
160	S	15,0	15,0	11,0	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15,0	11,0	—	—

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
180	S	22,0	22,0	—	—	—	—
	M	30,0	30,0	18,5	15,0	—	—
200	M	37,0	37,0	22,0	18,5	—	—
	L	45,0	45,0	30,0	22,0	—	—
225	M	55,0	55,0	37,0	30,0	—	—
250	S	75,0	75,0	45,0	37,0	30,0	—
	M	90,0	90,0	55,0	45,0	—	—
280	S	110,0	110,0	75,0	55,0	37,0	—
	M	132,0	132,0	90,0	75,0	45,0	—
315	S	160,0	160,0	110,0	90,0	55,0	45,0
	M	200,0	200,0	132,0	110,0	75,0	55,0
355	S	250,0	250,0	160,0	132,0	90,0	75,0
	M	315,0	315,0	200,0	160,0	110,0	90,0

3. Шкала мощностей асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А со степенью защиты IP23, основного исполнения, кВт

Высота оси вращения h, мм	Условная длина станины	Синхронная частота вращения, об/мин					
		3000	1500	1000	750	600	500
160	S	22,0	18,5	—	—	—	—
	M	30,0	22,0	—	—	—	—
180	S	37,0	30,0	18,5	15,0	—	—
	M	45,0	37,0	22,0	18,5	—	—
200	M	55,0	45,0	30,0	22,0	—	—
	L	75,0	55,0	37,0	30,0	—	—
225	M	90,0	75,0	45,0	37,0	—	—
250	S	110,0	90,0	55,0	45,0	—	—
	M	132,0	110,0	75,0	55,0	—	—
280	S	160,0	132,0	90,0	75,0	45,0	—
	M	200,0	160,0	110,0	90,0	55,0	—
315	S	—	200,0	132,0	110,0	75,0	55,0
	M	250,0	250,0	160,0	132,0	90,0	75,0
355	S	315,0	315,0	200,0	160,0	110,0	90,0
	M	400,0	400,0	250,0	200,0	132,0	110,0

Конструктивное оформление асинхронных машин претерпевает в последние годы заметное изменение. Наблюдается переход от круглых внешних очертаний к прямоугольным. Прямоугольная форма более эстетична, так

как она лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямоугольными линиями колонн, перекрытий, мостовых кранов. Прямоугольные станины электродвигателей со степенью защиты IP23 позволяют улучшить условия охлаждения без увеличения их габаритных размеров.

Электродвигатели с повышенным пусковым моментом предназначены для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска (компрессоры, поршневые насосы, транспортеры, дробилки и др.). Они выпускаются в исполнении по степени защиты IP44, в диапазоне высот оси вращения 160—250 мм на синхронные частоты вращения 1500, 1000, 750 об/мин и соответствуют ГОСТ 20818—75. По шкале мощностей, шкале установочных размеров и их взаимной увязке электродвигатели соответствуют основному исполнению. В их обозначение после серии добавляется буква Р, например 2АР180М8У3.

Электродвигатели с повышенным скольжением предназначены для привода механизмов с пульсирующей нагрузкой (штамповочных и кузнечно-прессовых машин), а также механизмов, работающих в повторно-кратковременном (S3) режиме. Они выпускаются в исполнении по степени защиты IP44, в диапазоне высот оси вращения 71—250 мм на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000, 750 об/мин и соответствуют ОСТ 16.0.510.026—75. В их обозначение после серии добавляется буква С, например 4АС200L6У3.

Многоскоростные электродвигатели предназначены для привода механизмов, требующих ступенчатого регулирования частоты вращения. Они соответствуют требованиям ОСТ 16.0.510.038—78 и выпускаются с высотами оси вращения:

синхронная частота вращения, об/мин	высота оси вращения, мм
1500/3000	56—250
750/1500	90—250
1000/1500	90—200
750/1000	90—250
500/1000	180—250
1000/1500/3000	100—160
750/1500/3000	100—160
750/1000/1500	100—250
750/1000/1500/3000	100
500/750/1000/1500	160—250

Эти электродвигатели выпускаются в исполнении по степени защиты 1Р44. В их обозначении приводятся все числа полюсов, на которые переключаются обмотки. Например, четырехскоростной электродвигатель с числами полюсов 12/8/6/4 обозначается: 4А200М12/8/6/4У3.

Электродвигатели с фазным ротором предназначены для привода механизмов, требующих плавного регулирования частоты вращения ниже номинальной (лебедки, волочильные станы), а также механизмов с особо тяжелыми условиями пуска (центрифуги, сепараторы). Выпускаются в исполнении по степени защиты 1Р44 (4АК) и 1Р23 (4АНК) соответственно в следующих диапазонах высот оси вращения: 160—250, 160—235.

Электродвигатели со встроенным тормозом применяются для привода механизмов, требующих фиксированного останова в регламентированное время (металлообрабатывающие станки). Выпускаются в исполнении по степени защиты 1Р44, в диапазоне высот оси вращения 56—160 мм. В их обозначение после числа полюсов добавляется буква Е, например 4А112М6ЕУ3.

Малошумные электродвигатели предназначены для работы в помещениях с пониженным уровнем шума (жилые здания, метрополитен). Выпускаются в исполнении по степени защиты 1Р44, в диапазоне высот оси вращения 56—160 мм с частотой вращения 1500, 1000 и 750 об/мин. В их обозначение после числа полюсов добавляется буква Н, например 4А160М6НУ3.

К специализированным исполнениям для различных условий окружающей среды относятся электродвигатели: тропического исполнения Т; для районов с холодным климатом ХЛ; химически стойкого исполнения Х; сельскохозяйственного исполнения СХ. Эти буквы в качестве дополнительных указываются после числа полюсов, например 4А132S2Т2, 4А90L2ХУ5, 4А132S2ХЛ2, 4А160М4СХУ2.

Электродвигатели постоянного тока применяются не так широко, как асинхронные, из-за меньшей надежности, сложности эксплуатации и большой стоимости, обусловленных наличием в их конструкции механического преобразователя частоты — коллектора, а также необходимостью специальных источников питания. Вместе с тем есть и преимущество, которое состоит в том, что при работе они допускают плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне, обладают высокими пусковыми и перегрузочными моментами. Это предопределило их применение в электроприводах, требующих изменения частоты вращения: в станкостроении, на электротранспорте, в металлургической, текстильной и полиграфической промышленности.

Электродвигатели общего назначения серии П в настоящее время заменяются новой серией 2П, имеющей следующие преимущества: повышенную перегрузочную способность, более широкий диапазон регулирования частоты вращения, повышенную мощность на единицу массы, надежность, малую вибрацию.

Расшифровка обозначения типоразмеров электродвигателей постоянного тока единой серии 2П следующая: 2 — порядковый номер; П — машина постоянного тока; исполнение: Н — защищенное с самовентиляцией, Ф — защищенное с независимой вентиляцией от постороннего вентилятора, Б — закрытое с естественным охлаждением, О — закрытое с обдувом от постороннего вентилятора; две или три цифры — высота оси вращения; М и L — условная первая или вторая длина сердечника якоря; Г — с тахогенератором; У — климатическое исполнение; 4 — категория размещения по ГОСТ 15150—69 и 1543—70.

Машины серии П подразделяются на три группы: мощностью 0,3—200 кВт (1—11-й габариты); мощностью 200—1400 кВт (12—17-й габариты); мощностью свыше 1400 кВт (18—26-й габариты). Габарит машины определяется диаметром якоря. Для каждого габарита имеются две длины сердечника. Исполнение электродвигателей от 1-го до 11-го габаритов по степени защиты 1Р22, по способу охлаждения — 1С01 или 1С05. Возбуждение смешанное.

Серия электродвигателей 2П охватывает диапазон высот оси вращения от 90 до 315 мм и мощностей от 0,37 до 200 кВт. Номинальные напряжения якорной цепи: 110, 220, 440 и 600 В; номинальные частоты вращения: 500, 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мин. Возбуждение независимое, номинальное напряжение возбуждения 110 и 220 В. Электродвигатели этой серии предназначены для работы как от источников постоянного тока, так и от тиристорных преобразователей.

Электродвигатели серии 2П имеют следующие степени защиты (по ГОСТ 17499—72): 1Р22 — с самовентиляцией (типа 2ПА) и с независимой вентиляцией от

постороннего вентилятора (типа 2ПН); 1Р44 — закрытое исполнение с естественным охлаждением (типа 2ПВ) и с наружным обдувом от постороннего вентилятора (типа 2П0).

Синхронные электродвигатели в промышленных установках используются для приводов, не требующих регулирования частоты вращения (компрессоры, насосы, шаровые мельницы, вентиляторы, двигатель-генераторные установки).

Изготовляются они как с неявнополюсными, так и с явнополюсными роторами. В неявнополюсном исполнении синхронные электродвигатели — турбодвигатели выпускаются с частотой вращения 3000 об/мин на мощности от 630 до 12500 кВт. Более широко применяются явнополюсные синхронные электродвигатели с диапазоном частот вращения от 1500 до 100 об/мин при мощности от нескольких сот до нескольких десятков тысяч киловатт.

В настоящее время явнополюсные синхронные электродвигатели общепромышленного применения выпускаются сериями СД2, СДН2, СДН3-2 и др. Основное их исполнение — с горизонтальным расположением вала, защищенные или закрытые с самовентиляцией, охлаждение — воздушное.

У синхронных электродвигателей не существует жесткой увязки мощностей с установочными размерами и высотой оси вращения, как у асинхронных машин.

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Общие положения

Правильный выбор мощности электродвигателя имеет большое значение. Недостаточная мощность может привести к нарушению нормальной работы механизма, снижению его производительности, чрезмерному повышению температуры отдельных частей и обмоток электродвигателя и в конечном итоге к выходу его из строя. Использование же электродвигателя завышенной мощности способствует неоправданному увеличению капитальных затрат, снижению электрических показателей, уменьшению КПД, а в установках переменного тока, кроме того, ухудшению коэффициента мощности, что, в свою очередь,

влияет на непроизводительную загрузку преобразовательных устройств и электрических сетей.

Мощность электродвигателя должна удовлетворять условиям допустимого нагрева, перегрузочной способности и пусковым условиям.

При выборе электродвигателя по нагреву исходят из того, что температура отдельных его частей во время работы не должна превышать предельно допустимых величин. Большое значение при этом имеет изоляция обмоток, практически определяющая срок службы машины. Предельно допустимая температура изоляционных материалов определяется классом нагревостойкости. Согласно ГОСТ 183—74, изоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, делятся на следующие классы нагревостойкости:

класс изоляции	A	E	B	F	H
предельно допустимая температура, °С	105	120	130	155	180

Стандартная температура окружающей среды (газообразной охлаждающей) принимается равной 40 °С. Таким образом, предельная температура нагрева

$$\vartheta_{пр} = \vartheta_0 + \tau_у,$$

где $\tau_у$ — допустимый предельный перегрев отдельных частей машины по сравнению с температурой окружающей среды.

Следовательно, номинальная мощность электродвигателя, указанная на его щитке, соответствует температуре окружающей среды, равной + 40 °С. При более низкой температуре электродвигатель может быть нагружен выше номинальной мощности, а при более высокой температуре нагрузку электродвигателя необходимо уменьшить, если не применять дополнительных мер для его охлаждения.

Точный расчет величины изменения мощности при отклонении температуры окружающей среды от стандартной может быть сделан лишь электромашиностроительным заводом, а ориентировочный расчет производится по следующей формуле:

$$P = P_н \sqrt{1 + (40 - \vartheta_0)(\kappa + 1)/\tau_у}$$

Городская централизованная библиотечная система г. Гомель

где $P_н$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; $k = \Delta p_х / \Delta_{нг.н}$ — коэффициент потерь; $\Delta p_х$ — потери активной мощности холостого хода (постоянные), кВт; $\Delta p_{нг.н}$ — нагрузочные потери (переменные) при номинальной нагрузке электродвигателя, кВт (см. с. 21).

В механической части машины наиболее подвержены перегреву подшипники. Поэтому при переходе на более форсированную работу электродвигателя (при пониженной температуре окружающей среды) необходимо тщательно наблюдать за температурой подшипников.

Предельно допустимая температура подшипников скольжения электрических машин не должна превышать 80 °С (температура масла при этом должна быть не более 65 °С), а подшипников качения — 100 °С.

При определении мощности электродвигателя необходимо учитывать не только установившийся режим работы, когда его скорость и нагрузка практически постоянны, но и переходные режимы (периоды пуска, торможения, наброса и сброса нагрузки). Расчет мощности с учетом переходных режимов требует предварительного построения нагрузочных диаграмм, под которыми понимают зависимости тока, момента, мощности от времени, т. е. I, M, $P(t)$. В этих случаях кроме расчета по нагреву электродвигатель должен быть проверен по перегрузке и по пусковым условиям.

Для каждого электродвигателя существует предельное значение момента, допустимого по условиям его нормальной работы. Отношение этого момента к номинальному $k_{макс} = M_{макс}/M_н$ называется перегрузочной способностью электродвигателя. Для асинхронных и синхронных электродвигателей величина $k_{макс}$ указывается в каталогах. Для электродвигателей постоянного тока допустимая перегрузка ограничивается условиями коммутации. При токе якоря выше номинального на коллекторе возникает сильное искрение, появляется опасность кругового огня, в результате чего машина выходит из строя. Здесь кратность максимального тока по отношению к номинальному составляет: $k_{макс} = I_{макс}/I_н = 2—2{,}5$ (электродвигатели общепромышленной серии) и $k_{макс} = 3{,}5—4$ (электродвигатели крановово-металлургической серии). Конкретные данные о перегрузочной способности приводятся в технических условиях.

При пуске электродвигателей под нагрузкой требуется их проверка по пусковым условиям. Для асинхронных короткозамкнутых электродвигателей общепромышленной серии (например, 4А) для характеристики пускового процесса в каталогах приводятся две величины: кратность начального пускового момента $k_{нач} = M_{нач}/M_н$ и кратность минимального пускового момента $k_{мин} = M_{мин}/M_н$. Асинхронные электродвигатели с фазным ротором пускаются в ход с помощью пускового реостата. Наличие в нем пусковых резисторов обеспечивает плавность пуска и позволяет получить пусковой момент, равный максимальному. Поэтому для этих электродвигателей в каталоге не приводятся значения кратностей пускового момента.

Для синхронных электродвигателей, пуск которых осуществляется в асинхронном режиме, в каталогах указывается кратность пускового момента $k_{пуск} = M_{пуск}/M_н$.

При пуске электродвигателей постоянного тока пусковой момент, как и максимальный, определяется условиями коммутации и имеет примерно ту же кратность.

Потери активной мощности в электродвигателе

Нагревание электродвигателя происходит за счет потерь активной мощности, возникающих при преобразовании электрической энергии в механическую. Эти потери делятся на постоянные, не зависящие от нагрузки, и переменные, зависящие от нагрузки.

Постоянные потери относятся к потерям холостого хода. Они включают потери в стали (от гистерезиса и вихревых токов), механические (на трение в подшипниках, контактных колец о щетки, щеток о коллектор в машинах постоянного тока) и на вентиляцию.

Переменные, или нагрузочные, потери пропорциональны квадрату тока, протекающего по основным обмоткам (якоря — у электродвигателей постоянного тока, ротора и статора — у асинхронных электродвигателей и статора — у синхронных электродвигателей).

Рассмотрим потери мощности для наиболее сложного случая на примере энергетической диаграммы асинхронного трехфазного электродвигателя (рис. 1).

Подводимая к статору электродвигателя активная мощность (кВт)

$$P_1 = 3U_{1ф}I_{1ф}\cos\varphi \cdot 10^{-3},$$

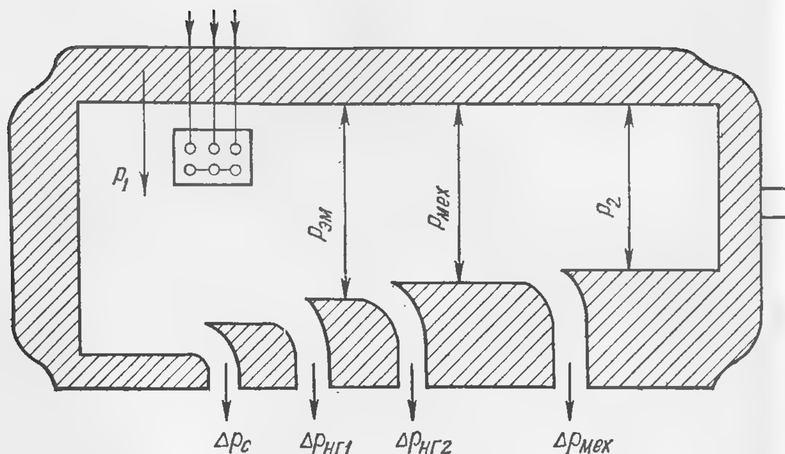


Рис. 1. Энергетическая диаграмма асинхронного электродвигателя

где $U_{1ф}$ — фазное напряжение, В; $I_{1ф}$ — ток в фазе статора, А; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности электродвигателя.

Часть этой мощности тратится на потери от гистерезиса и вихревых токов в стали электродвигателя $\Delta p_с$ и на потери в обмотке статора $\Delta p_{нг1}$.

Нагрузочные потери в обмотке статора (кВт) можно определить из выражения:

$$\Delta p_{нг1} = 3I^2_{ф1} R_1 \cdot 10^{-3},$$

где R_1 — активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

Остальная мощность передается на ротор основным магнитным потоком и называется электромагнитной:

$$P_{эм} = P_1 - (\Delta p_с + \Delta p_{нг1}).$$

Часть этой мощности расходуется на потери в обмотке ротора, которые можно определить по формуле:

$$\Delta p_{нг2} = 3I^2_2 R_2 \cdot 10^{-3},$$

где I_2 — ток ротора, А; R_2 — активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом.

Другая часть мощности преобразуется в полную механическую $P_{мех}$. Она приводит в движение ротор электродвигателя, в результате чего создаются механические потери $\Delta p_{мех}$. Остаток мощности, полученный как разность между полной механической мощностью и механическими потерями, поступает на вал электродвигателя и называется полезной мощностью P_2.

Между подводимой P_1 и полезной P_2 мощностью существует определенная зависимость:

$$P_1 = P_2/\eta = k_{нг} P_н/\eta,$$

где $k_{нг} = P_2/P_н$ — коэффициент нагрузки электродвигателя; η — КПД электродвигателя, соответствующий данному $k_{нг}$; $P_н$ — полезная мощность на валу электродвигателя при номинальной нагрузке.

Из энергетической диаграммы асинхронного электродвигателя следует, что полные потери имеют следующие составляющие:

$$\Delta p = P_1 - P_2 = \Delta p_с + \Delta p_{мех} + \Delta p_{нг1} + \Delta p_{нг2}.$$

Потери $\Delta p_с + \Delta p_{мех} = \Delta p_х$ относятся к потерям холостого хода, а потери $\Delta p_{нг1} + \Delta p_{нг2} = \Delta p_{нг}$ — к нагрузочным.

Нагрузочные потери пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки, т. е.

$$\Delta p_{нг} = k^2_{нг} \Delta p_{нг.н}, \quad (1)$$

где $\Delta p_{нг.н}$ — потери при номинальной нагрузке электродвигателя.

С учетом уравнения (1) полные потери можно записать в следующем виде:

$$\Delta p = \Delta p_x + \Delta p_{нг} = \Delta p_x + k^2_{нг} \Delta p_{нг.н}. \quad (2)$$

При расчете мощности электродвигателя, а также при решении задач по рациональному использованию асинхронных электродвигателей необходимо определить потери применительно к каждому электродвигателю. Наиболее просто это сделать, если известны мощность на валу и КПД электродвигателя. В режиме номинальной нагрузки эти данные приводятся на паспортном щитке. Тогда полные номинальные потери можно определить по формуле:

$$\Delta p_{н} = \frac{P_{н}}{\eta_{н}} - P_{н} = P_{н}\left(\frac{1-\eta_{н}}{\eta_{н}}\right), \qquad (3)$$

где $\eta_{н}$ — КПД электродвигателя при номинальной нагрузке.

При частичной нагрузке, т. е. при данном $k_{нг}$, полные потери будут равны:

$$\Delta p = \frac{P_2}{\eta} - P_2 = \frac{k_{нг}P_{н}}{\eta} - k_{нг}P_{н} = k_{нг}P_{н}\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right). \qquad (4)$$

Для определения Δp по формуле (4) необходимо по каждому электродвигателю иметь кривую зависимости КПД в функции нагрузки $\eta(k_{нг})$. Подобные кривые могут быть построены по данным, которые приводятся в каталогах и справочной литературе (см. каталог 01.01.63—77 «Двигатели асинхронные трехфазного тока единой серии 4А мощностью от 0,06 до 400 кВт», где приводятся значения КПД при $k_{нг}$ = 25, 50, 75, 100, 125 %).

При разделении полных потерь на постоянные $\Delta p_{х}$ и переменные $\Delta p_{нг}$ основная трудность заключается в определении потерь холостого хода $\Delta p_{х}$. Имея каталожные данные $\eta(k_{нг})$, потери холостого хода можно определить по формуле:

$$\Delta p_{x} = \frac{\Delta p - k_{нг}^{2}\Delta p_{н}}{1 - k_{нг}^{2}}. \qquad (5)$$

Пример. Определить потери холостого хода и нагрузочные для асинхронного короткозамкнутого электродвигателя типа 4А160М8У3; $P_{н}$ = 11 кВт; $U_{н}$ = 380 В; $I_{н}$ = 25,6 А; $n_{н}$ = 730 об/мин; $\eta_{н}$ = 87 %; $\cos\varphi_{н}$ = 0,75. Значения КПД при частичных нагрузках следующие:

$k_{нг}$, %	25	50	75	100	125
η, %	81,0	87,0	88,0	87,0	85,0

Полные потери активной мощности при номинальной нагрузке согласно формуле (5) составят:

$$\Delta p_{н} = P_{н}\left(\frac{1-\eta_{н}}{\eta_{н}}\right) = 11\left(\frac{1-0{,}87}{0{,}87}\right) = 1{,}64 \text{ кВт}.$$

Принимаем $k_{нг}$ = 75 % и находим полные потери по формуле (4):

$$\Delta p = k_{нг}P_{н}\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) = 0{,}75 \cdot 11\left(\frac{1-0{,}88}{0{,}88}\right) = 1{,}13 \text{ кВт}.$$

Отсюда потери холостого хода согласно выражению (5) составят:

$$\Delta p_{x} = \frac{\Delta p - k_{нг}^{2}\Delta p_{н}}{1 - k_{нг}^{2}} = \frac{1{,}13 - 0{,}75^2 \cdot 1{,}64}{1 - 0{,}75^2} = 0{,}47 \text{ кВт}.$$

Соответственно номинальные нагрузочные потери

$$\Delta p_{нг.н} = \Delta p_{н} - \Delta p_{x} = 1{,}64 - 0{,}47 = 1{,}17 \text{ кВт}.$$

Отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке

$$k = \Delta p_{x}/\Delta p_{нг.н} = 0{,}47/1{,}17 = 0{,}4.$$

Коэффициент k называется коэффициентом потерь активной мощности и относится к числу важных величин, характеризующих тепловой режим работы электродвигателя. Он зависит от угловой скорости, конструктивных и электрических параметров электродвигателя. С его помощью можно определить мощность электродвигателя при различных номинальных режимах его работы, допустимую нагрузку его при отклонении температуры окружающей среды от стандартной, допустимое число включений в час асинхронных короткозамкнутых электродвигателей и другие параметры.

Нагрев и охлаждение электродвигателя

Как уже отмечалось, нагрев электродвигателя обусловлен потерями энергии, возникающими в процессе преобразования электрической энергии в механическую.

В момент включения электродвигателя он имеет температуру окружающей среды (или, как принято говорить, находится в холодном состоянии), и поэтому все тепло, выделяемое в нем при протекании тока, идет на нагревание его частей. Когда температура электродвигателя превысит температуру окружающей среды, начнется процесс отдачи тепла. При неизменной нагрузке через определенный промежуток времени температура электродвигателя достигнет установившегося значения и все выделяемое тепло будет рассеиваться в окружающую среду. Наступит тепловое равновесие, и дальнейший рост температуры электродвигателя прекратится.

Установившемуся тепловому режиму будет соответствовать определенная величина перегрева. При номи-

пальной нагрузке и температуре окружающей среды $+40\,^{\circ}C$ величина перегрева не должна превышать предельного значения, установленного ГОСТом для данного класса нагревостойкости изоляционных материалов. Это положение берется в основу расчета мощности электродвигателя и выбора его по нагреву.

Нагрев электродвигателя связан с изменением его температуры во времени. Эти изменения подчиняются уравнению теплового баланса электродвигателя:

$$\Delta p dt = C d\tau + A\tau dt, \qquad (6)$$

где Δp — потери активной мощности при данной нагрузке электродвигателя, Вт; C — теплоемкость, количество тепла, необходимое для повышения температуры электродвигателя на 1 градус, Дж/град; A — теплоотдача, количество тепла, отдаваемое электродвигателем в окружающую среду в течение 1 с при разности температур в 1 градус, Дж/с · град; τ — перегрев, превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды, град; t — время нагрева (охлаждения), с; dt — элемент времени, в течение которого выделится энергия в виде тепла $\Delta p dt$; $d\tau$ — перегрев, соответствующий элементу времени dt, град.

Из уравнения (6) можно получить два параметра, характеризующих тепловой режим работы электродвигателя:

$$\Delta p/A = \tau_у \;\; (7) \;\; \text{и} \;\; C/A = T_н, \qquad (8)$$

где $\tau_у$ — значение перегрева, характеризующее установившееся тепловое состояние электродвигателя при данной нагрузке, град; $T_н$ — постоянная времени нагрева, с.

Величина $T_н$ характеризует скорость нагревания электродвигателя. Её можно представить себе как время, в течение которого температура электродвигателя достигнет установившегося значения, характеризуемого конечным перепадом температур $\tau_у$ при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду. Значение $T_н$ остается неизменным при любой нагрузке электродвигателя, так как величины C и A, входящие в формулу (8), определяются конструктивными данными машины и практически постоянны.

Выражение (8) показывает, что $T_н$ будет тем больше, чем больше теплоемкость C, которая зависит от размеров машины. С увеличением габаритов (массы) машины требуется больше тепла для повышения ее температуры на 1 градус, т. е. тем больше будет ее теплоемкость, а следовательно, постоянная времени нагрева $T_н$.

С другой стороны, величина $T_н$ обратно пропорциональна A — теплоотдаче, которая в значительной мере зависит от охлаждения, т. е. от вентиляции машины. Поэтому при прочих равных условиях постоянная времени $T_н$ вентилируемых машин значительно меньше, чем невентилируемых.

Для электродвигателей небольшой мощности $T_н$ примерно составляет 10—20 мин, для крупных двигателей — несколько часов.

Процесс нагрева электродвигателя, работающего с некоторой нагрузкой, можно представить как зависимость температуры от времени, т. е. $\tau(t)$. Для этого выражения (7) и (8) необходимо подставить в основное уравнение нагрева (6). Принимая в начальный момент работы электродвигателя перегрев равным нулю, получим уравнение нагрева в следующем виде:

$$\tau = \tau_у\left(1 - e^{-\frac{t}{T_н}}\right), \qquad (9)$$

где $e = 2{,}718$ — основание натуральных логарифмов; t — время, для которого определяется перегрев τ, с.

На рис. 2 показана кривая *1* нагрева электродвигателя, построенная по уравнению (9). Как видно из рисунка, вначале температура электродвигателя растет быстро, а по мере его нагрева рост ее замедляется. Теоретически процесс нагрева длится бесконечно. Практически же он считается законченным, когда $\tau = 0{,}95\tau_у$, что соответствует времени $t = 3T_н$.

При отключении электродвигателя от сети нагрев его прекращается и начинается процесс охлаждения, при котором $\Delta p = 0$. Уравнение (6) для случая охлаждения примет вид:

$$\tau = \tau_у e^{-\frac{t}{T_0}}, \qquad (10)$$

где T_0 — постоянная времени охлаждения, аналогичная постоянной времени нагрева.

При равенстве постоянных $T_н$ и T_0 кривая охлаждения *2* (рис. 2) является зеркальным отображением кривой нагрева. Но такое положение имеет место только

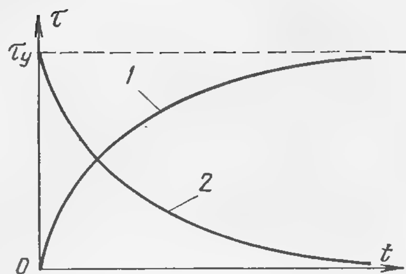


Рис. 2. Кривые нагрева *1* и охлаждения *2* электродвигателя

у продуваемых электродвигателей, имеющих независимую вентиляцию. Благодаря этому теплоотдача электродвигателя при работе A равна его теплоотдаче в состоянии покоя A_0, что при неизменности теплоемкости C дает $T_н = T_0$.

В электродвигателях с самовентиляцией интенсивность охлаждения в условиях теплообмена и теплоотдачи различна и в большой степени зависит от угловой скорости электродвигателя. Поэтому постоянная времени охлаждения у неподвижного электродвигателя примерно в 3—4 раза больше, чем у вращающегося.

Для улучшения охлаждения электродвигателя существует несколько способов вентиляции. Одним из наиболее распространенных является самовентиляция, когда нагреваемые части двигателя охлаждаются вентилятором, расположенным на роторе машины (в асинхронных короткозамкнутых электродвигателях малой мощности роль вентилятора выполняют лопатки, закрепленные на короткозамыкающих кольцах). Самовентиляция может быть внутренней и наружной. При внутренней самовентиляции в сердечнике ротора и в статоре предусматриваются вентиляционные каналы. Если каналы расположены параллельно оси вала, то вентиляция называется аксиальной, если перпендикулярно к оси вала, то вентиляция называется радиальной. Для этого сталь ротора и статора делят на пакеты шириной 40—80 мм каждый, а между ними оставляют каналы шириной до 10 мм.

При наружной самовентиляции вентилятор вынесен на наружный конец вала и обдувает внешнюю поверхность статора, которая выполняется ребристой.

Основные конструктивные факторы, влияющие на мощность электродвигателя

При длительной работе электродвигателя с номинальной нагрузкой уравнение нагрева (6) можно представить в виде:

$$\Delta p_н = A\tau_у. \qquad (11)$$

Так как полные номинальные потери согласно формуле (3) равны:

$$\Delta p_н = P_н(1 - \eta_п/\eta_н),$$

то, учитывая выражение (11), номинальную мощность электродвигателя можно выразить через конструктивные факторы, характеризующие его тепловые свойства:

$$P_н = A\tau_у/(1 - \eta_н). \qquad (12)$$

Из формулы видно, что мощность электродвигателя прямо пропорциональна теплоотдаче A, которая во многом зависит от вентиляции. Чем лучше вентилируется электродвигатель, тем выше теплоотдача. Поэтому нагрузка вентилируемых электродвигателей может быть повышена по сравнению с невентилируемыми. Иначе говоря, при одних и тех же габаритах мощность вентилируемых электродвигателей больше мощности невентилируемых. В практике бывают случаи, когда конструктивное исполнение электродвигателя не увязывают с условиями окружающей среды. Например, вместо закрытого устанавливают защищенный электродвигатель и для защиты от пыли, мелкой стружки его закрывают кожухом (ящиком). При этом ухудшается его теплоотдача, а следовательно, уменьшается в 2—3 раза и мощность.

Формула (12) дает возможность установить целесообразность применения нагревостойкой изоляции, так как при этом повышается $\tau_у$, т. е. предельный перегрев, что позволяет при тех же габаритах увеличить мощность электродвигателя и при данной мощности уменьшить размеры машины и, следовательно, ее массу.

Мощность электродвигателя при одних и тех же габаритах можно повысить путем увеличения коэффициента полезного действия, что в свою очередь зависит от уменьшения потерь в стали, механических и вентиляционных, а также совершенствования схем электрических обмоток машин.

В условиях эксплуатации величины A, $\tau_у$, $\eta_н$ заданы и задача сводится к тому, чтобы технически грамотно их использовать. Регулярные продувки, очистка поверхности электродвигателей от пыли увеличивают теплоотдачу и позволяют наиболее полно использовать их мощность.

Некачественный ремонт может вызвать значительные потери мощности, что приведет к увеличению нагрева и преждевременному выходу электродвигателя из строя.

Номинальные режимы работы электродвигателей

При рассмотрении процессов нагрева и охлаждения электродвигателя было сделано предположение, что его нагрузка в течение длительного времени остается постоянной, а следовательно, остается неизменным и перепад температуры τ. В действительности нагрузка электродвигателя в процессе его работы может меняться. Кроме того, электродвигатель может периодически отключаться на некоторое время. Все это оказывает влияние на его нагрев и охлаждение. ГОСТ 183—74 предусматривает восемь номинальных режимов работы электродвигателя, учет которых позволяет более точно рассчитать его мощность. Режимы S1, S2, S3 и S6 относятся к основным, а остальные — к дополнительным. Ниже приводится краткая характеристика основных режимов.

Продолжительный S1 (рис. 3, *а*) — это работа длительное время при неизменной нагрузке, в течение которого температура электродвигателя достигает установившегося значения (при неизменной температуре окружающей среды).

Кратковременный S2 (рис. 3, *б*), когда период неизменной нагрузки чередуется с периодом отключения электродвигателя от сети; при этом за время работы $t_р$ температура электродвигателя не достигает установившегося значения, а за время паузы t_0 он успевает полностью охладиться. Для этого режима устанавливается следующая продолжительность рабочего периода $t_р$: 15, 30, 60 и 90 мин.

Повторно-кратковременный S3 (рис. 3, *в*), при котором периоды неизменной нагрузки чередуются с периодами отключения электродвигателя от сети; при этом за время работы $t_р$ его температура не достигает установившегося значения, а за время паузы t_0 электродвигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Этот режим характеризуется длительностью цикла работы, которая согласно стандарту принимается равной 10 мин, и относительной (в процентах) продолжительностью включения, определяемой по формуле:

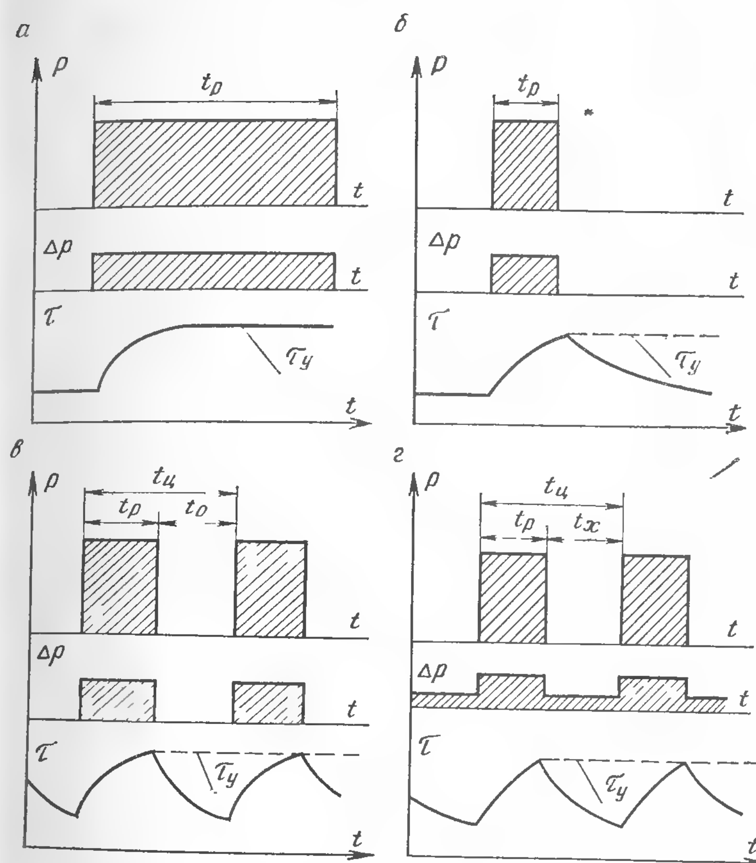


Рис. 3. Основные номинальные режимы работы электродвигателей и соответствующие изменения мощности *P* на валу электродвигателя, потерь активной мощности Δ*p* и перепада температуры τ во времени *t*:

а — продолжительный (S1); *б* — кратковременный (S2); *в* — повторно-кратковременный (S3); *г* — перемежающийся (S6)

$$ПВ = 100t_р/(t_р + t_0) = 100t_р/t_ц, \quad (13)$$

где $t_р$ — время работы; t_0 — время паузы; $t_ц = t_р + t_0$ — время цикла.

Нормируемые значения ПВ: 15, 25, 40, 60 % или $\varepsilon = t_р/(t_р + t_0) = t_р/t_ц = 0{,}15;\ 0{,}25;\ 0{,}4;\ 0{,}6$.

Перемежающийся S6 (рис. 3, *г*) режим отличается от повторно-кратковременного тем, что после периода работы электродвигатель не отключается от сети, а продолжает работать вхолостую. Он характеризуется относительной продолжительностью нагрузки ПН, которая определяется по формуле:

$$\text{ПН} = 100 t_р / (t_р + t_х), \qquad (14)$$

где $t_х$ — время холостого хода.

Нормируемые значения ПН: 15, 25, 40, 60 %; продолжительность одного цикла 10 мин.

Нагрузочные диаграммы

Нагрузочная диаграмма характеризует зависимость вращающего момента, тока или мощности, развиваемой электродвигателем, от времени. Она используется для оценки перегрузочной способности электродвигателя и сопоставления ее с допустимой кратковременной нагрузкой, а также для проверки мощности предварительно выбранного электродвигателя по нагреву.

Нагрузочная диаграмма учитывает статические и динамические нагрузки, преодолеваемые электродвигателем в течение цикла работы механизма.

Статические нагрузки определяются на основании технологических данных, характеризующих работу производственного механизма, а динамические оцениваются инерционными моментами, которые возникают в системе электродвигатель — рабочая машина при изменении частоты вращения (пуск электродвигателя, торможение, наброс и сброс нагрузки).

Рассмотрим построение нагрузочной диаграммы на примере грузоподъемного механизма. На кинематической схеме подъемника m — масса груза; v — скорость подъема; Б — барабан подъемного механизма, который приводится в движение электродвигателем M; D — диаметр барабана (рис. 4).

В соответствии с технологическими данными механического оборудования и требуемой производительностью установки задается примерная диаграмма скорости (тахограмма) одного цикла работы подъемника (рис. 4, *а*), предусматривающая: время углового ускорения t_1 (пуск электродвигателя); длительность установившегося ре-

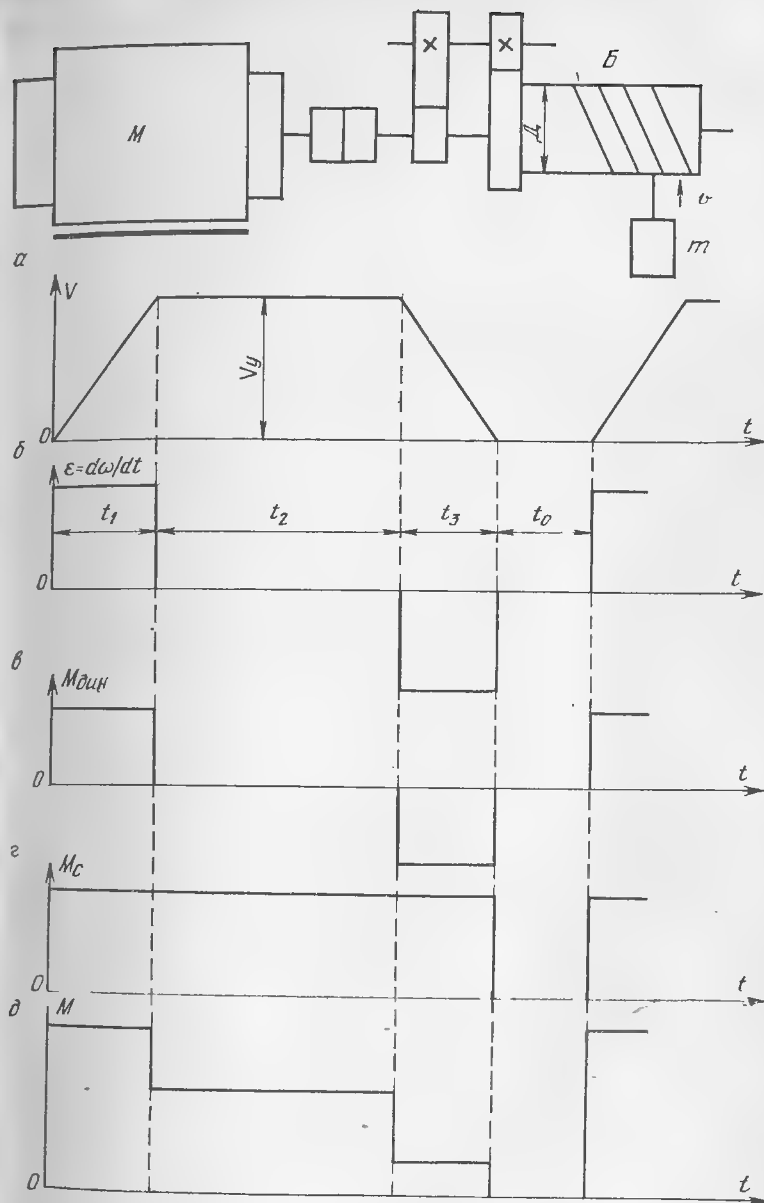


Рис. 4. Кинематическая схема грузоподъемного механизма и нагрузочные диаграммы:

а — скорости (тахограмма); *б* — ускорения привода; *в* — динамического момента; *г* — механизма; *д* — электропривода

жима t_2; время углового замедления t_3 (торможение электродвигателя) и время паузы между соседними циклами t_0. Цикл работы подъемника повторяется. Графику скорости соответствует график углового ускорения и замедления (рис. 4, *б*), абсолютные значения которых постоянны и имеют разные знаки соответственно на участках t_1 и t_3. На участках пуска и торможения действуют динамические моменты (рис. 4, *в*), значения которых равны: $M_{дин} = J_\Sigma d\omega/dt$, где J_Σ — суммарный момент инерции системы электродвигатель — рабочая машина, приведенный к валу электродвигателя. Далее определяется статический момент нагрузки, приведенный к валу электродвигателя, $M_c = mgR/i\eta_п$, где m — масса поднимаемого груза; g — ускорение силы тяжести; R — радиус барабана; i — передаточное отношение редуктора; $\eta_п$ — КПД передачи. Зависимость $M_c(t)$ приведена на рис. 4, *г*. Для данной подъемной установки M_c остается во времени постоянным.

Мощность и угловая скорость электродвигателя должны быть выбраны предварительно. Ориентировочная мощность электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$P = k_з mgv \cdot 10^3/\eta_п,$$

где $k_з$ — коэффициент запаса, равный 1,2—1,3 и учитывающий влияние динамических моментов; v — скорость подъемника, по значению которой в соответствии с равенством $v = \omega R$ устанавливается номинальная угловая скорость электродвигателя.

Зависимость $M(t)$, представляющая собой нагрузочную диаграмму на валу электродвигателя (рис. 4, *д*), может быть получена в результате алгебраического суммирования статического и динамического моментов, т. е. $M = M_c \pm M_{дин}$. В зависимости от соотношения статического и динамического моментов на участке замедления может возникать либо положительный, либо отрицательный момент. Например, для нагрузочной диаграммы, приведенной на рис. 4, *д*, $M_{дин} < M_c$, следовательно, момент электродвигателя в период замедления должен быть положительным, т. е. движущим, и электрического торможения не требуется.

В производственных условиях нагрузочные диаграммы можно получить с помощью самопишущих приборов методом амперметра и секундомера.

Расчет мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы (S1)

Неизменная нагрузка. Существует много механизмов, работающих продолжительно с неизменной или мало меняющейся нагрузкой без регулирования скорости, например насосы, компрессоры, вентиляторы и т. п.

При выборе электродвигателя для такого режима необходимо знать мощность, потребляемую механизмом. Если эта мощность неизвестна, ее определяют теоретическими расчетами или расчетами по эмпирическим формулам с использованием коэффициентов, полученных из многочисленных опытов. Для малоизученных механизмов необходимую мощность определяют путем снятия нагрузочных диаграмм самопишущими приборами на имеющихся уже в эксплуатации аналогичных установках либо путем использования нормативов потребления энергии, полученных на основании статистических данных, учитывающих удельный расход электроэнергии при выпуске продукции.

При известной мощности механизма мощность электродвигателя выбирается по каталогу с учетом КПД промежуточной передачи. Расчетная мощность на валу электродвигателя $P = P_м/\eta_п$, где $P_м$ — мощность, потребляемая механизмом; $\eta_п$ — КПД передачи. Номинальная мощность электродвигателя, принятого по каталогу, должна быть равна или несколько больше расчетной.

Выбранный электродвигатель не нуждается в проверке по нагреву или по перегрузке, так как завод-изготовитель произвел все расчеты и испытания, причем основанием для расчетов являлось максимальное использование материалов, заложенных в электродвигателе при его номинальной мощности. Иногда, однако, приходится проверять достаточность пускового момента, развиваемого электродвигателем, учитывая, что некоторые механизмы имеют повышенное сопротивление трения в начале трогания с места (например, транспортеры, некоторые механизмы металлорежущих станков).

Мощность (кВт) электродвигателя для насоса определяется по формуле:

$$P = k_з \frac{gQH\gamma}{\eta_{нас}\eta_п} 10^{-3} = k_з \frac{Qp}{\eta_{нас}\eta_п} 10^{-3}, \quad (15)$$

где $k_з$ — коэффициент запаса, принимаемый 1,1—1,3

2 Зак. 818

в зависимости от мощности электродвигателя; g — ускорение свободного падения, м/с²; Q — подача (производительность) насоса, м³/с; H — расчетная высота подъема, м; γ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; $\eta_{нас}$ — КПД насоса (для поршневого 0,7—0,9; для центробежного с давлением свыше $0{,}4 \cdot 10^5$ Па 0,6—0,75, с давлением до $0{,}4 \cdot 10^5$ Па 0,45—0,6); $\eta_п$ — КПД передачи, равный 0,9—0,95; $p = \gamma H g$ — давление, развиваемое насосом, Па.

Для центробежного насоса особенно важен правильный выбор частоты вращения электродвигателя, так как производительность насоса Q, расчетная высота H, момент M и мощность P на валу электродвигателя зависят от угловой скорости ω. Для одного и того же насоса значения Q_1, H_1, M_1, P_1 при ω_1 связаны со значениями Q_2, H_2, M_2, P_2 при скорости ω_2 соотношениями $Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2$; $H_1/H_2 = M_1/M_2 = \omega_1^2/\omega_2^2$; $P_1/P_2 = \omega_1^3/\omega_2^3$.

Из этих соотношений следует, что при завышении угловой скорости электродвигателя потребляемая им мощность резко возрастает, что приводит к перегреву его и выходу из строя. При заниженной скорости создаваемый насосом напор может оказаться недостаточным, и насос не будет перекачивать жидкость.

Мощность (кВт) электродвигателя для поршневого компрессора

$$P = k_з \frac{QA}{\eta_к \eta_п} 10^{-3}, \qquad (16)$$

где Q — подача (производительность) компрессора, м³/с; $A = (A_и + A_а)/2$ — работа изотермического и адиабатического сжатия 1 м³ атмосферного воздуха давлением $p_1 = 1{,}1 \cdot 10^5$ Па до требуемого давления p_2, Дж/м³; для давлений до $10 \cdot 10^5$ Па значения A следующие:

p_2, 10^5 Па . . .	3	4	5	6	7	8	9	10
A, 10^{-3} Дж/м³ . . .	132	164	190	213	230	245	260	272

$\eta_к$ — индикаторный КПД компрессора, равный 0,6—0,8; $\eta_п$ — КПД передачи, равный 0,9—0,95; $k_з$ — коэффициент запаса, равный 1,05—1,15.

Мощность (кВт) электродвигателя для вентилятора

$$P = k_з \frac{QH}{\eta_в \eta_п} 10^{-3}, \qquad (17)$$

где Q — производительность вентилятора, м³/с; H — давление на выходе вентилятора, Па; $\eta_в$ — КПД вентилятора, равный 0,5—0,85 для осевых, 0,4—0,7 — для центробежных вентиляторов; $\eta_п$ — КПД передачи; $k_з$ — коэффициент запаса, равный 1,1—1,2 при мощности более 5 кВт, 1,5 — при мощности до 2 кВт и 2,0 — при мощности до 1 кВт.

По формуле (17) определяется также мощность электродвигателя для центробежного вентилятора.

Эксплуатационные свойства механизмов центробежного типа (насосов, компрессоров и вентиляторов) определяются зависимостью напора (давление жидкости или газа на выходе механизма) от производительности при различных угловых скоростях механизма. Эти зависимости, называемые $Q - H$ характеристиками, обычно приводятся в виде графиков в каталогах для каждого конкретного механизма.

Пример. Выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором для привода центробежного насоса, обеспечивающий при угловой скорости $\omega \approx 290$ рад/с ($n \approx 2900$ об/мин) производительность $Q = 100$ м³/ч (0,028 м³/с) и расчетную подачу $H = 98$ м. Плотность перекачиваемой жидкости $\gamma = 1000$ кг/м³.

Насос непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_п = 1$), КПД насоса $\eta_{нас} = 0{,}62$. Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирования скорости насоса не требуется. Условия окружающей среды требуют применения электродвигателя исполнения IP44.

Давление, развиваемое насосом,

$$p = \gamma H g = 1000 \cdot 98 \cdot 9{,}8 = 9{,}6 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Мощность электродвигателя находим по формуле (15)

$$P = \frac{1{,}1 Q p \cdot 10^{-3}}{\eta_{нас} \eta_п} = \frac{1{,}1 \cdot 0{,}028 \cdot 9{,}6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{0{,}62 \cdot 1} = 48 \text{ кВт}.$$

Выбираем по каталогу электродвигатель серии 4А225М2У3; $P_н = 55$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 2945$ об/мин ($\omega \approx 295$ рад/с).

Так как номинальная частота вращения электродвигателя практически не отличается от частоты вращения насоса, пересчет мощности не требуется.

Пример. Рассчитать мощность и выбрать по каталогу электродвигатель для привода поршневого компрессора производительностью $Q = 20$ м³/мин. Начальное давление воздуха $p_1 = 1{,}1 \cdot 10^5$ Па, конечное на выходе $p_2 = 10 \cdot 10^5$ Па; индикаторный КПД компрессора $\eta_к = 0{,}78$. Требуемая угловая скорость электродвигателя $\omega = 100$ рад/с.

По данным, приведенным на с. 34, для $p_2 = 10 \cdot 10^5$ Па находим

2*

$A = 272 \cdot 10^3$ Дж/м³. Приняв $k_з = 1{,}05$ и КПД передачи $\eta_п = 0{,}95$, рассчитываем мощность электродвигателя по формуле (16):

$$P = \frac{k_з Q A 10^{-3}}{\eta_к \eta_п} = \frac{1{,}05 \cdot 20 \cdot 272 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 0{,}78 \cdot 0{,}95} = 130 \text{ кВт}.$$

Принимаем по каталогу асинхронный короткозамкнутый электродвигатель исполнения 1Р23 серии 4АН315S6У3; $P_н = 132$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 985$ об/мин ($\omega_н \approx 100$ рад/с).

Пример. Рассчитать мощность и выбрать по каталогу электродвигатель для привода вентилятора, обеспечивающий при угловой скорости $\omega_н = 100$ рад/с производительность $Q = 3$ м³/с и напор $H = 570$ Па. Значение КПД вентилятора $\eta_в = 0{,}64$. Вентилятор непосредственно соединен с электродвигателем.

Требуемую мощность электродвигателя при $Q = 3$ м³/с и $\eta_п = 1$ можно определить по формуле (17):

$$P = \frac{k_з Q H \cdot 10^{-3}}{\eta_в \eta_п} = \frac{1{,}1 \cdot 3 \cdot 570 \cdot 10^{-3}}{0{,}64 \cdot 1} = 3 \text{ кВт}.$$

Принимаем по каталогу асинхронный короткозамкнутый электродвигатель исполнения 1Р44 серии 4А112МА6У3; $P_н = 3$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 955$ об/мин ($\omega_н \approx 100$ рад/с).

Переменная нагрузка (режим перемежающийся S6). Большинство механизмов, работающих в продолжительном режиме, имеют меняющийся график нагрузки (металлорежущие станки, кузнечно-штамповочные машины, ножовочные пилы, долбежные и дыропробивные станки, станки-автоматы и др.).

График продолжительной переменной нагрузки в общем виде приведен на рис. 5. Из графика видно, что температура электродвигателя в течение цикла непрерывно меняется, вследствие чего рассчитать его мощность по нагреву более сложно по сравнению с постоянной нагрузкой. Если выбрать электродвигатель по наибольшей мощности, то она окажется завышенной, и наоборот. Будет неправильным также расчет мощности, соответствующей среднему значению нагрузки, так как среднее значение мощности по нагрузочной диаграмме не учитывает квадратичной зависимости потерь в электродвигателе от тока, протекающего в обмотке. При больших колебаниях нагрузки мощность электродвигателя, выбранная по среднему значению, будет заниженной.

Учитывая эти обстоятельства, необходимо применять другие методы определения мощности электродвигателя при переменной нагрузке. Обычно рекомендуются методы эквивалентных величин (потерь мощности, тока, момента и мощности) на валу электродвигателя. При расчете мощности по этим методам действительный график продолжительного режима переменной нагрузки заменяется графиком продолжительного режима неизменной нагрузки при условии, что нагрев электродвигателя за одно и то же время цикла в обоих случаях будет одинаков.

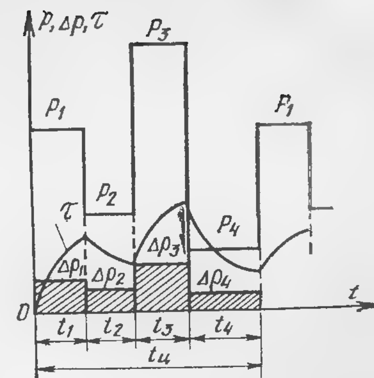


Рис. 5. График мощности (P), потерь (Δp) и перегревов (τ) при продолжительном режиме с переменной нагрузкой

Порядок расчета мощности электродвигателя следующий. Предварительно выбирают электродвигатель по данным статической нагрузки и строят нагрузочную диаграмму, по которой, используя один из методов эквивалентных величин, определяют необходимую мощность электродвигателя. Если полученное значение мощности не отличается от значения предварительно выбранной величины, значит, расчет правильный и выбранный электродвигатель будет удовлетворять требованиям нагрева. При необходимости электродвигатель проверяют по перегрузочной способности и по пусковым условиям.

В случае существенного (до 20 % и более) расхождения между предварительно выбранной мощностью и эквивалентной величиной выясняется причина расхождения и расчет повторяется.

Сущность метода средних (эквивалентных) потерь заключается в нахождении средних потерь $\Delta p_{ср}$ при заданном графике нагрузки и сравнении их с номинальными потерями $\Delta p_н$ предварительно выбранного электродвигателя.

Средние потери должны быть равны или несколько меньше потерь при работе электродвигателя с номинальной мощностью, т. е.

$$\Delta p_{ср} \leqslant \Delta p_н.$$

Средние потери в электродвигателе за цикл определяются по формуле:

$$\Delta p_{ср} = \frac{\Delta p_1 t_1 + \Delta p_2 t_2 + \ldots + \Delta p_n t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}, \quad (18)$$

где Δp_1, Δp_2, ... Δp_n — потери мощности на участках нагрузочного графика (рис. 5).

Для нахождения потерь необходимо иметь кривую КПД электродвигателя в функции нагрузки. Потери рассчитываются по формуле:

$$\Delta p_1 = P_1(1 - \eta_1)/\eta_1;\ \Delta p_2 = P_2(1 - \eta_2)/\eta_2;\ \ldots\ \Delta p_n = P_n(1 - \eta_n)/\eta_n.$$

Определение средних потерь по формуле (18) справедливо для электродвигателей с самовентиляцией, работающих с постоянной скоростью, близкой к номинальной, а также для электродвигателей с независимой вентиляцией.

Метод средних потерь является универсальным и наиболее точным для проверки выбранного электродвигателя по условиям его нагрева. Однако сложность расчетов, необходимость наличия параметров электродвигателя ограничивает его применение.

Пример. Рассчитать мощность и выбрать асинхронный короткозамкнутый электродвигатель исполнения 1Р44 для привода токарного станка. Нагрузочный график $P(t)$ на валу электродвигателя приведен на рис. 6. Угловая скорость на валу электродвигателя $\omega = 150$ рад/с; мощность холостого хода станка $P_х = 1$ кВт; время холостого хода $t_х = 4$ с; мощность на валу в режиме нагрузки: $P_1 = 4{,}2$ кВт; $P_2 = 3$ кВт, соответственно $t_1 = 3$ с; $t_2 = 2$ с.

Предварительно выбираем электродвигатель по средней мощности с учетом коэффициента запаса $k_з = 1{,}3$:

$$P_{ср} = \frac{P_х t_х + P_1 t_1 + P_х t_х + P_2 t_2}{t_х + t_1 + t_х + t_2} = \frac{1 \cdot 4 + 4{,}2 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + 3 \cdot 2}{4 + 3 + 4 + 2} = 2{,}73 \text{ кВт}.$$

По каталогу принимаем электродвигатель серии 4А100S4У3; $P_н = 3$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 1435$ об/мин ($\omega_н \approx 144$ рад/с); $I_н = 6{,}7$ А; $\eta_н = 82$ %; $\cos\varphi_н = 0{,}84$; $I_{пуск}/I_н = 6$; $M_{пуск}/M_н = 2$; $M_{нач}/M_н = 1{,}6$; $M_{макс}/M_н = 2{,}4$.

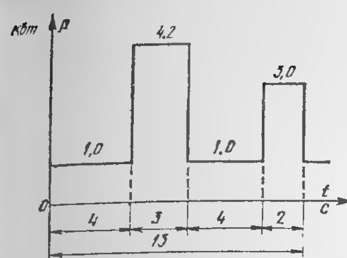


Рис. 6. Нагрузочный график на валу электродвигателя токарного станка

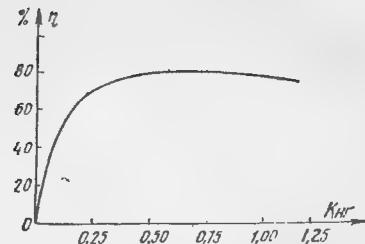


Рис. 7. Кривая КПД в функции коэффициента нагрузки асинхронного электродвигателя серии 4А100S4У3, $P_н = 3$ кВт

Значения КПД при частичных нагрузках (по каталогу):

$k_{нг}$, %	25	50	75	100	125
η, %	75,5	82	83	82	79,5

По этим данным строим кривую КПД в функции нагрузки (рис. 7) и определяем потери мощности при нагрузках 1, 3, 4,2 кВт по формуле $\Delta p = P(1 - \eta)/\eta$. Потери соответственно составляют 0,43; 0,66 и 1,1 кВт. Потери при номинальной нагрузке $\Delta p_н = P_н (1 - \eta_н)/\eta_н = 3(1 - 0{,}82)/0{,}82 = 0{,}66$ кВт.

Находим средние потери по формуле (18)

$$\Delta p_{ср} = \frac{\Delta p_х t_х + \Delta p_1 t_1 + \Delta p_х t_х + \Delta p_2 t_2}{t_х + t_1 + t_х + t_2} = \frac{0{,}43 \cdot 4 + 1{,}1 \cdot 3 + 0{,}43 \cdot 4 + 0{,}66 \cdot 2}{4 + 3 + 4 + 2} = 0{,}62 \text{ кВт}.$$

Так как $\Delta p_{ср} \approx \Delta p_н (0{,}62 \approx 0{,}64)$, то электродвигатель удовлетворяет требованиям нагрева.

Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую, поэтому проверка по пусковому моменту не производится.

Проверка электродвигателя по перегрузочной способности требует, чтобы наибольший момент по нагрузочному графику $M_{макс.гр}$ был меньше максимального момента, развиваемого электродвигателем, т. е.

$$M_{макс.гр} < 0{,}9^2 M_{макс},$$

где величина $0{,}9^2$ учитывает возможное снижение напряжения в эксплуатационных условиях на 10 %.

Максимальный момент $M_{макс} = k_м M_н = (M_{макс}/M_н) \cdot (P_н \cdot 10^3/\omega_н) = 2{,}4 \cdot 3 \cdot 10^3/144 = 50$ Н · м.

Наибольший момент по нагрузочному графику находим исходя из условия, что угловая скорость и коэффициент мощности электродвигателя практически не изменяются от момента холостого хода

до максимального момента. При этом будет иметь место пропорциональность между наибольшей мощностью по графику и соответствующим ей наибольшим моментом.

Таким образом,

$$M_{\text{макс.гр}} = M_1 \approx P_1 \cdot 10^3/\omega_{\text{н}} = 4{,}2 \cdot 10^3/144 = 29 \ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Электродвигатель проходит по перегрузке, так как согласно равенству

$$M_1 = 29 \ \text{Н} \cdot \text{м} < 0{,}9^2 M_{\text{макс}} = 0{,}9^2 \cdot 50 \approx 40 \ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Методы эквивалентного тока, момента и мощности. Как уже отмечалось, полные потери мощности в электродвигателе можно выразить через сумму постоянных и переменных потерь. Переменные потери пропорциональны квадрату тока главной цепи электродвигателя. Поэтому можно записать

$$\Delta p = \Delta p_{\text{x}} + I_{\text{э}}^2 R, \qquad (19)$$

где $I_{\text{э}}$ — эквивалентный ток, т. е. ток, который при переменном графике нагрузки $I(t)$ за время $t_{\text{ц}}$ выделит такое же количество тепла, что и постоянный по величине ток за это же время.

Подставив в формулу (18) значение Δp из уравнения (19) и учитывая, что постоянные потери не зависят от нагрузки, после соответствующих преобразований получим формулу для эквивалентного тока:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (20)$$

При $I_{\text{э}} \leqslant I_{\text{н}}$ электродвигатель отвечает условиям полного использования по нагреву.

Метод эквивалентного тока широко используется в практике при определении мощности электродвигателя. Он предполагает независимость постоянных потерь от нагрузки и неизменное сопротивление главной цепи электродвигателя на всех участках графика нагрузки.

Часто для проверки электродвигателя по нагреву и особенно при предварительном его выборе пользуются графиками момента или мощности, т. е. $M(t)$, $P(t)$.

При неизменном магнитном потоке, когда момент электродвигателя пропорционален току: $M = c\Phi I \equiv I$, для его проверки можно воспользоваться методом эквивалентного момента. Для ступенчатого графика эквивалентный момент определяется по формуле:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (21)$$

Эквивалентный момент сопоставляют с номинальным, и если $M_{\text{э}} \leqslant M_{\text{н}}$, значит, электродвигатель полностью используется по нагреву.

Этот метод применим для электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением, а также асинхронных и синхронных электродвигателей, работающих с номинальным магнитным потоком.

Когда нагрузочная диаграмма на валу электродвигателя задана графиком мощности, то выбор и проверка его по нагреву могут выполняться методом эквивалентной мощности:

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (22)$$

Этот метод применяется для проверки по нагреву асинхронных и синхронных электродвигателей, а также электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением, работающих с номинальным потоком и постоянной или мало меняющейся угловой скоростью.

Пример. Определить мощность электродвигателя для привода механизма, работающего по нагрузочному графику, приведенному на рис. 8. Угловая скорость приводного вала $\omega = 145$ рад/с.

По формуле (21) находим эквивалентный момент

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{400^2 \cdot 10 + 257^2 \cdot 30 + 100^2 \cdot 50}{10 + 30 + 50}} = 213 \ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Расчетная мощность электродвигателя

$$P = M_{\text{э}}\omega 10^{-3} = 213 \cdot 145 \cdot 10^{-3} = 30{,}9 \ \text{кВт}.$$

Принимаем по каталогу ближайший больший по мощности асинхронный короткозамкнутый электродвигатель серии 4А180М4У3; $P_{\text{н}} = 37$ кВт; $U_{\text{н}} = 380$ В; $I_{\text{н}} = 68{,}8$ А; $\eta_{\text{н}} = 91$ %; $\cos\varphi_{\text{н}} = 0{,}90$; $n_{\text{н}} = 1475$ об/мин ($\omega_{\text{н}} \approx 148$ рад/с); $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}} = 1{,}4$; $M_{\text{мин}}/M_{\text{н}} = 1$; $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 2{,}5$.

Номинальный момент предварительно выбранного электродвигателя

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot 10^3/\omega_{\text{н}} = 37 \cdot 10^3/148 = 252 \ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

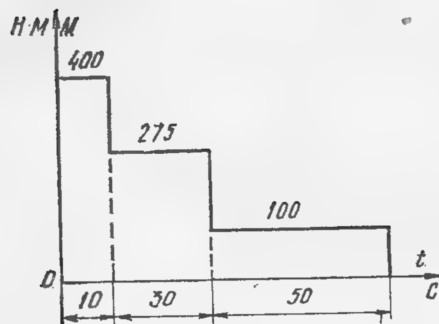


Рис. 8. Нагрузочный график продолжительного режима с переменной нагрузкой

Максимальный и пусковой моменты с учетом возможного снижения напряжения в эксплуатационных условиях на 10 % составят:

$M_{макс} =$

$= 0{,}9^2 \cdot 2{,}5 \cdot 252 =$

$= 504$ Н · м;

$M_{пуск} =$

$= 0{,}9^2 \cdot 1{,}4 \cdot 252 =$

$= 286$ Н · м.

Момент сопротивления при пуске 400 Н · м.

Таким образом, выбранный электродвигатель не удовлетворяет пусковым условиям, так как $M_{пуск} = 286$ Н · м < 400 Н · м. За ним следует электродвигатель мощностью 45 кВт. Однако, как показывают расчеты, и эта мощность не обеспечивает нужного пускового момента. Исходя из условий задачи, нужно брать электродвигатель серии 4А250S4У3 мощностью 75 кВт. Он будет удовлетворять требованиям пуска, но иметь низкие энергетические (КПД, $\cos\varphi$) и экономические (большие габариты, массу и соответственно большую стоимость) показатели по сравнению с электродвигателем мощностью 37 кВт, выбранным по условию нагрева.

Рассмотрим другой вариант расчета. Примем электродвигатель с повышенным пусковым моментом серии 4АР180М4У3; $P_н = 37$ кВт; $n_н = 1470$ об/мин ($\omega_н = 147$ рад/с); $M_{пуск}/M_н = 2$; $M_{мин}/M_н = 1{,}6$; $M_{макс}/M_н = 2{,}2$. Его следует проверить только по условиям пуска:

$$M_{пуск} = 0{,}9^2 \cdot 2 \cdot 37 \cdot 10^3/147 = 400 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Как видно из расчета, данный электродвигатель удовлетворяет как требованиям нагрева, так и условиям механической перегрузки и пускового момента.

Следовательно, в тех случаях, когда момент сопротивления при пуске имеет большие значения (превышает номинальный), целесообразно принимать электродвигатели с повышенным пусковым моментом.

Более сложен расчет мощности электродвигателя для механизмов длительного режима с переменной нагрузкой, нагрузочный график которых представляет собой чередование резкого повышения и снижения нагрузки (рис. 9). К таким механизмам относятся ковочные машины, прессы, молоты, поршневые насосы, некоторые прокатные станы, компрессоры и др. Режим их работы характеризуется ударной нагрузкой на валу электродвигателя, когда статический момент резко возрастает в период ее увеличения, а затем снижается до момента холостого хода. При этом время холостого хода относительно велико по сравнению с периодом нагрузки.

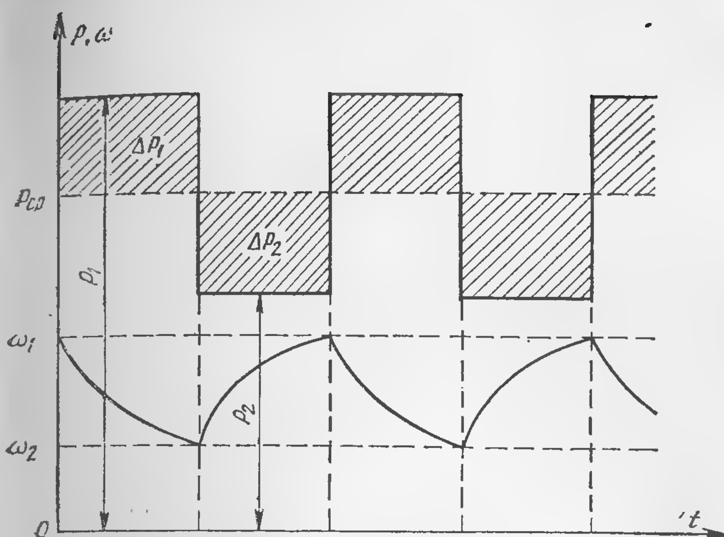


Рис. 9. Нагрузочная диаграмма механизма с ударной нагрузкой

Для таких механизмов мощность электродвигателя приходится рассчитывать не по эквивалентной величине, а по перегрузочной способности, что приводит к недоиспользованию электродвигателя по нагреву, снижению его энергетических показателей.

Мощность электродвигателя можно снизить и приблизить к требуемой по нагреву, если выровнять нагрузочный график. Для выравнивания графика при конструировании механизма искусственно завышают его маховой момент путем установки маховика. При этом угловая скорость электродвигателя (при набросе нагрузки P_1, рис. 9) будет снижаться от ω_1 до ω_2, в связи с чем запасенная в период разгона в системе электродвигатель — рабочая машина кинетическая энергия уменьшится на величину $\Delta A = J(\omega_1^2 - \omega_2^2)/2$, где J — приведенный к валу электродвигателя момент инерции системы. Эта энергия передается на вал электродвигателя и затрачи-

вается на преодоление пика нагрузки (заштрихованная часть графика), что приводит к уменьшению мощности, потребляемой электродвигателем из сети.

В периоды сброса нагрузки (P_2, рис. 9), когда скорость электродвигателя возрастает, во вращающихся элементах увеличивается запас кинетической энергии. В это время электродвигатель будет потреблять дополнительную мощность из сети. В результате график нагрузки выравнивается, а эквивалентная мощность приближается к средней $P_{ср}$. Так же будет уменьшаться и максимальная мощность на валу электродвигателя. Наличие маховика позволяет снизить номинальную мощность выбираемого электродвигателя.

Из приведенного выражения кинетической энергии

$$\Delta A = J(\omega_1^2 - \omega_2^2)/2$$

следует, что для ее использования необходимо, чтобы электродвигатель имел мягкую механическую характеристику, т. е. заметно снижал угловую скорость при увеличении нагрузки до максимальной (на 10—15 %). Электродвигатели нормального исполнения, например асинхронные серии 4А, имеют жесткие механические характеристики (снижение скорости в среднем на 2—4 %). Для получения мягких механических характеристик в асинхронных электродвигателях искусственно увеличивают скольжение. Достигается это включением дополнительного резистора в цепь ротора, применением жидкостных или контакторных регуляторов скольжения. Для электроприводов средней и небольшой мощности промышленность выпускает асинхронные короткозамкнутые электродвигатели единой серии 4А с повышенным скольжением. В отличие от основного исполнения ротор этих двигателей имеет уменьшенные размеры пазов и заливается специальным сплавом повышенного сопротивления. Электродвигатели выпускаются с высотой оси вращения 71—250 мм на номинальные мощности 0,3—63 кВт при ПВ = 40 %, частотой вращения 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин на номинальные скольжения 7—11 %.

Правила выбора момента инерции маховика и расчет мощности электродвигателя, работающего в режиме ударной нагрузки, сложны и поэтому здесь не рассматриваются. При замене электродвигателя с маховиковым приводом при планово-предупредительных ремонтах желательно подбирать его из той же серии и с номинальными данными, аналогичными данным заменяемого электродвигателя.

Расчет мощности электродвигателя при повторно-кратковременном (S3) и кратковременном (S2) режимах работы

Режим повторно-кратковременной нагрузки. Одноступенчатый график этого режима приведен на рис. 3, *в*. Он характеризуется циклами работы, которые складываются из периодов нагрузки и пауз, частыми пусками и торможением. Вследствие этого условия нагрева и охлаждения электродвигателей отличаются от аналогичных условий при длительном режиме. Это отличие особенно заметно у электродвигателей с самовентиляцией, у которых количество охлаждающего воздуха, прогоняемого через машину, зависит от угловой скорости. В длительном режиме угловая скорость в период работы мало изменяется, и поэтому создаются нормальные условия для отвода тепла в окружающую среду. В повторно-кратковременном режиме условия теплоотдачи резко ухудшаются. В связи с этим в краново-металлургической серии выпускаются электродвигатели, предназначенные для работы с повторно-кратковременной нагрузкой. Они работают при большом числе включений в час (60—600), с частыми перегрузками и реверсами, в условиях повышенной влажности и запыленности, вибрации и ударов, поэтому конструкции их узлов и деталей отличаются высокой прочностью и надежностью.

Ротор (якорь) крановых электродвигателей имеет удлиненную форму и соответственно меньший диаметр по сравнению с электродвигателями длительного режима работы. Такая конструкция ротора позволяет уменьшить его момент инерции, а следовательно, и время переходного режима, что приводит к увеличению производительности кранового механизма, сокращению потерь энергии.

Эти электродвигатели обладают высокой перегрузочной способностью и повышенным пусковым моментом. Однако при этом они имеют более низкие энергетические показатели — коэффициент полезного действия, а асинхронные — и коэффициент мощности.

Промышленность выпускает электродвигатели крано-во-металлургической серии переменного и постоянного тока, изоляционные материалы которых имеют класс нагревостойкости F и H.

В крановых электродвигателях переменного тока за номинальный принят режим с ПВ = 40 %, а в электродвигателях постоянного тока — наряду с режимом ПВ = = 40 % и 60-минутный режим.

Крановые асинхронные электродвигатели серии MTF выполняются с фазным ротором, серии MTKF — с короткозамкнутым ротором. Класс нагревостойкости F. Синхронная частота вращения — 1000, 750 и 600 об/мин. Первая цифра трехзначного числа, стоящего после буквенного обозначения, определяет условный внешний диаметр пакета статора, вторая — порядковый номер серии, третья — условную длину пакета статора, цифра после дефиса — число полюсов электродвигателя. Например, MTKF012-6 — крановый электродвигатель с короткозамкнутым ротором первого габарита, второй длины, шестиполюсный.

Электродвигатели нулевого габарита изготовляются в крановом исполнении, а 5, 6, 7-го габаритов — в металлургическом (серия MTH).

Крановo-металлургические электродвигатели постоянного тока изготовляются серии Д (взамен устаревшей ДП) с классом нагревостойкости H.

Для механизмов с большим числом включений (до 2000 в час) выпускаются тихоходные электродвигатели (порядка 1000—400 об/мин), с числом включений примерно до 3000 в час — быстроходные, имеющие номинальную частоту вращения на 30—55 % большую, чем тихоходные.

В настоящее время налаживается выпуск крановo-металлургических электродвигателей переменного тока серии 4MT. Эта серия более совершенна, экономична, надежна (срок службы около 20 лет), имеет лучшие энергетические характеристики и экономические показатели.

Для повторно-кратковременного режима применяются электродвигатели из серии нормального исполнения и крановo-металлургической.

Если для этого режима применяются электродвигатели нормального исполнения, что характерно для большинства металлорежущих станков, то расчет мощности электродвигателя в случае многоступенчатого графика нагрузки (рис. 10) ведется по формулам средних потерь и эквивалентных величин, но с учетом пауз (в знаменателях) и потерь в переходных режимах. Например, формула (18) примет вид:

$$\Delta p_{\text{ср}} = \frac{\Delta A_{\text{п}} + \Delta p_1 t_1 + \Delta p_2 t_2 + \ldots + \Delta p_n t_n + \Delta A_{\text{т}} t_{\text{т}}}{\beta_{\text{п}} t_{\text{п}} + t_1 + t_2 + \ldots + t_n + \beta_{\text{т}} t_{\text{т}} + \beta_0 t_0}, \quad (23)$$

где $\Delta A_{\text{п}}$ и $\Delta A_{\text{т}}$ — потери энергии в электродвигателе при пуске и торможении, кВт; $t_{\text{п}}$, $t_{\text{т}}$, t_0 — время пуска, торможения и паузы, с; β_0 — коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи электродвигателя в неподвижном состоянии (для электродвигателя с принудительной вентиляцией $\beta_0 = 0{,}9—1{,}0$; для закрытого с наружным охлаждением от собственного вентилятора на валу $\beta_0 = 0{,}45—0{,}55$; для защищенного с самовентиляцией $\beta_0 = 0{,}25—0{,}35$); $\beta_{\text{п}} = \beta_{\text{т}} = (1 + \beta_0/2)$ — коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения электродвигателя при пуске и торможении.

Если для режима повторно-кратковременной нагрузки выбирается асинхронный короткозамкнутый электродвигатель, предназначенный для продолжительного режима работы, необходимо проверить его на допустимое число включений в час. Это обусловлено тем, что при частых включениях короткозамкнутого электродвигателя потери энергии, вызываемые переходными процессами (пуск, торможение), приводят к его интенсивному нагреву и ограничивают, следовательно, допустимое число включений.

Допустимой частотой включений (числом включений в час) h считается такая частота, при которой средняя температура электродвигателя после большого числа рабочих циклов будет равна максимально допустимой.

Допустимое число включений в час

$$h \approx 3600 \frac{(\Delta p_{\text{п}} - \Delta p)\varepsilon + \Delta p_{\text{н}}(1 - \varepsilon)}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}}}, \quad (24)$$

где $\Delta p_{\text{н}}$ и Δp — потери активной мощности при номинальной и фактической нагрузке, кВт; ε — коэффициент относительной продолжительности включения по графику ($\varepsilon = t_{\text{р}}/t_{\text{ц}}$; $t_{\text{р}} = t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}}$ — время работы; $t_{\text{п}}$, $t_{\text{у}}$, $t_{\text{т}}$ —

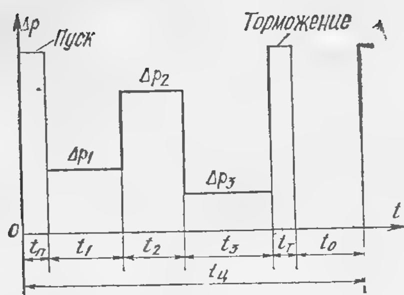


Рис. 10. График потерь с режимами пуска и торможения

время пуска, установившегося режима и торможения, с); $\Delta A_п$ и $\Delta A_т$ — потери энергии при пуске и торможении, кВт.

Допустимое число включений сопоставляется с расчетным $h_р = 3600/t_ц$, и если $h > h_р$, значит, электродвигатель пригоден для работы по заданному графику.

Потери энергии $\Delta A_п$ и $\Delta A_т$ зависят от сопротивления ротора. Поэтому асинхронные электродвигатели с повышенным скольжением, имеющие высокие значения сопротивления ротора, допускают большее число включений в час.

Из формулы (24) видно, что число включений в час асинхронного короткозамкнутого электродвигателя существенно зависит от потерь энергии при пуске и торможении, которые, в свою очередь, связаны с соотношением активных сопротивлений статора и ротора R_1/R'_2. С увеличением сопротивления ротора R'_2 это соотношение при постоянном значении R_1 уменьшается, в связи с чем уменьшаются пусковые и тормозные потери, а допустимое число включений увеличивается. Этому условию удовлетворяют электродвигатели с повышенным скольжением, у которых активное сопротивление ротора R'_2 значительно больше, чем у электродвигателей нормального исполнения. Поэтому электродвигатели с повышенным скольжением рекомендуется применять в электроприводах с большим числом включений в час.

Мощность электродвигателя из краново-металлургической серии рассчитывается обычно на основе нагрузочного графика (рис. 11). При этом многоступенчатый график заменяется эквивалентным одноступенчатым, т. е. приводится к стандартному для режима S3 с помощью формулы:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (25)$$

Время паузы в формулу не включается, так как оно учитывается при определении фактической продолжительности включения.

Фактическая продолжительность включения

$$ПВ_ф = 100 t_р/t_ц, \qquad (26)$$

где $t_р$ — время работы электродвигателя в периоде $t_ц$ (см. рис. 11).

Если фактическая продолжительность включения, полученная по расчету (эквивалентная), и мощность электродвигателя отвечают стандартным значениям, то мощность электродвигателя выбирается по данным каталога.

При расхождении между $ПВ_ф$ и стандартной величиной $ПВ_{ст}$ делается пересчет эквивалентной мощности на новую расчетную величину P по упрощенной формуле:

$$P = P_э \sqrt{ПВ_ф/ПВ_{ст}}, \qquad (27)$$

где $ПВ_{ст}$ принимается наиболее близко к $ПВ_ф$.

Полученная расчетная мощность должна удовлетворять условию $P \leqslant P_п$.

Выбранный по каталогу электродвигатель нуждается в проверке по перегрузке и пусковым условиям.

Режим кратковременной нагрузки. В этом режиме работают зажимные устройства металлорежущих станков, механизмы быстрых перемещений суппортов, бабок, поперечин, раздвижных мостов, шлюзовых сооружений.

Стандартный график работы электродвигателя в кратковременном режиме приведен на рис. 3, *б*. Практически нагрузочный график может быть многоступенчатым (рис. 12), который в последующих расчетах приводится к эквивалентному одноступенчатому, т. е. к стандартному для режима S2 с помощью формулы (25).

Электродвигатели, предназначенные для кратковременного режима работы, отличаются повышенной перегрузочной способностью с нормированной длительностью работы — 10, 30, 60 и 90 мин.

Мощность такого электродвигателя рассчитывается по методу эквивалентных величин с последующим выбором его по каталогу и нормированному времени работы. В этом случае электродвигатель будет полностью использован по нагреву. Выбранный электродвигатель требует проверки по перегрузке и пусковым условиям.

3 Зак., 818

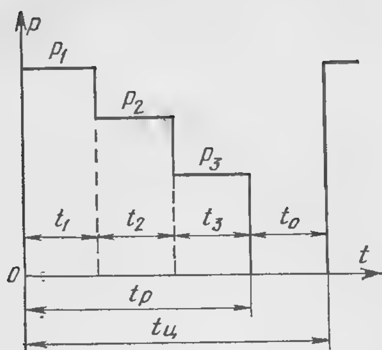


Рис. 11. График нагрузки, характеризующий повторно-кратковременный режим работы

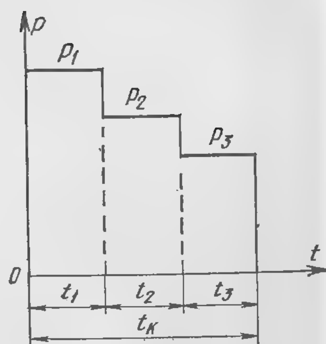


Рис. 12. График нагрузки, характеризующий кратковременный режим работы

Если же время работы электродвигателя, работающего по заданному нагрузочному графику, отличается от каталожного, то следует определить его новую мощность, при которой он будет полностью использован по нагреву (пересчет мощности ввиду сложности здесь не приводится).

При кратковременном режиме могут применяться электродвигатели, рассчитанные на режим повторно-кратковременной нагрузки. При этом принимают, что 30-минутной работе соответствует продолжительность включения $ПВ_{ст} = 40\,\%$, 60-минутной — $ПВ_{ст} = 60\,\%$.

Расчет мощности электродвигателя при кратковременной нагрузке и применение электродвигателя, предназначенного для продолжительного режима, производится из соображений допустимой перегрузки, так как нагрев электродвигателя вследствие относительно малой величины рабочего периода не достигает обычно установившегося значения.

Расчет мощности электродвигателя для кратковременного режима рассмотрим на примере асинхронного электропривода механизма перемещения металлорежущего станка.

Мощность, расходуемая на преодоление сил трения при горизонтальном перемещении элемента станка (кВт)

$$P_{тр} = F_{тр} v 10^{-3} = 9{,}8 G \mu v 10^{-3}, \qquad (28)$$

где $F_{тр}$ — сила трения, Н; v — скорость элемента станка, м/с; G — масса элемента, кг; μ — коэффициент трения движения.

Мощность на валу электродвигателя по условиям перегрузки (кВт)

$$P = P_{тр}/\lambda_1 \eta_п, \qquad (29)$$

где λ_1 — коэффициент допустимой перегрузки, равный 1,6; $\eta_п$ — КПД передачи станка, равный 0,1—0,2.

По каталогу подбирают ближайший электродвигатель большей мощности $P_н$ и находят величины $M_{макс}/M_н$; $M_{пуск}/M_н$; $M_{нач}/M_н$.

Момент электродвигателя при перегрузке (Н · м)

$$M = P \cdot 10^3/\omega_c (1 - \lambda_1 s_н). \qquad (30)$$

Момент сопротивления в начале пуска электродвигателя больше, чем во время работы, и вычисляется по формуле:

$$M_c = \frac{P \mu_0 10^{-3}}{\omega_0 (1 - \lambda_1 s_н) \mu}, \qquad (31)$$

где μ_0 — коэффициент трения покоя.

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ЕГО НОМИНАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Выбор электродвигателя по мощности тесно связан с его конструктивным исполнением. При отсутствии специальных требований следует использовать электродвигатели единых серий, что ведет к снижению капитальных затрат.

Конструктивное оформление машины, как уже отмечалось, связано с исполнениями по степени защиты, по способам охлаждения и монтажа. В производственных условиях важное значение имеет выбор конструктивного типа электродвигателя в зависимости от характера окружающей среды (по степени защиты). При этом следует руководствоваться указаниями, изложенными в «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ, раздел V, 1977).

Электродвигатели единых серий переменного и по-

стоянного тока изготовляются на большие угловые скорости. Это объясняется тем, что при данной мощности повышение номинальной скорости электродвигателя позволяет уменьшить его размеры, снизить массу и уменьшить стоимость. Так, например, электродвигатель типа 4А180М2У3 мощностью 30 кВт с частотой вращения 2945 об/мин имеет массу 185 кг, а электродвигатель той же мощности типа 4А250S10У3 с частотой вращения 590 об/мин — 490 кг, т. е. в 2,65 раза больше. Рабочие механизмы, наоборот, в большинстве случаев требуют малых угловых скоростей. Для согласования угловых скоростей электродвигателя и рабочей машины между ними предусматривают промежуточную передачу, например редуктор.

Таким образом, быстроходность электродвигателя приводит к снижению его стоимости, но с другой стороны — к увеличению передаточного числа, массы и габаритов передачи, что удорожает установку.

Для приводов с редкими пусками передаточное число (а следовательно, и номинальную угловую скорость электродвигателя) выбирают исходя из минимальной стоимости электродвигателя и редуктора.

Выбор оптимального передаточного числа для приводов с частыми пусками является сложной задачей, которая решается применительно к конкретному типу привода на основе технико-экономических сопоставлений расчетных вариантов.

ВЫБОР РОДА ТОКА И ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Так как на большинстве предприятий используется переменный трехфазный ток, а электродвигатели переменного тока наиболее просты, надежны и экономичны, то во всех случаях, где это только возможно, им следует отдавать предпочтение, особенно асинхронным короткозамкнутым электродвигателям. Предел их применения определяется мощностью системы электроснабжения данного предприятия, так как большие пусковые токи электродвигателей с короткозамкнутым ротором при малой мощности системы вызывают сильные колебания напряжения и делают невозможным пуск электродвигателя. Если по условиям пуска недопустима установка асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, то

применяют асинхронные двигатели с фазным ротором.

Синхронные электродвигатели требуют более высоких капитальных затрат по сравнению с асинхронными. Они относятся к нерегулируемым и применяются также с целью компенсации реактивной мощности. Целесообразность применения синхронных электродвигателей следует проверить технико-экономическим расчетом. При мощности свыше 100 кВт применение синхронных электродвигателей целесообразно.

Использование постоянного тока требует дополнительных капитальных вложений и повышенных эксплуатационных расходов (для преобразования переменного тока). Поэтому оно может быть оправдано лишь в тех случаях, когда электропривод должен обеспечить повышенные требования к диапазону регулирования скорости, плавности регулирования, характеру переходных процессов и т. п.

До сравнительно недавнего времени большинство широко регулируемых электроприводов выполнялось на постоянном токе. В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники расширилась область применения регулируемых асинхронных электроприводов (частотное регулирование, асинхронные вентильные каскады), которые во многих случаях могут заменять электроприводы постоянного тока.

При сопоставлении вариантов регулируемого электропривода постоянного и переменного тока прежде всего должны учитываться два основных положения: степень удовлетворения технических требований к электроприводу (диапазон и плавность регулирования; точность поддержания скорости и заданных динамических свойств; получение нужных механических характеристик и т. п.) и обеспечение заданной производительности механизма. Как правило, применение электропривода, обеспечивающего большую производительность, всегда будет оправдано.

В том случае, если сравниваемые варианты по своим техническим показателям примерно равноценны, сопоставляются капитальные затраты на оборудование и эксплуатационные расходы (годовые издержки). Эти затраты для каждого варианта определяются по формуле:

$$З = С + Е_н К,$$

где С — эксплуатационные расходы; К — капитальные

затраты; Ен — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат.

Тот вариант, для которого данная сумма будет наименьшей, признается оптимальным.

Род тока выбирается отдельно для каждого привода. Наличие двух родов тока в электрооборудовании рабочей машины, если это дает преимущество в отношении производительности, удобства и простоты обслуживания, вполне допустимо.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НА ВАЛУ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ

Асинхронный электродвигатель потребляет два вида мощности: активную и реактивную. Активная мощность реализуется в полезную работу, а реактивная идет на создание магнитных полей в электродвигателе (вращающееся и поле рассеяния).

Потребление электродвигателем реактивной мощности практически постоянно и не зависит от нагрузки. Поэтому в режимах малой загрузки асинхронных электродвигателей, являющихся основными потребителями реактивной мощности, заметно сказывается ее влияние на технико-экономические показатели работы энергосистемы.

В связи с этим существенное значение приобретает вопрос рентабельности использования асинхронных электродвигателей, которая повышается по мере приближения их коэффициента нагрузки к оптимальному. При этом наряду с уменьшением удельного расхода электроэнергии на единицу продукции растет коэффициент использования механизма и его производительность.

В целях повышения рентабельности работы асинхронных электродвигателей и приближения их нагрузочного режима к наивыгоднейшему необходимо знать фактический коэффициент их нагрузки.

Определение фактического коэффициента нагрузки асинхронного электродвигателя

Этот коэффициент можно установить путем определения нагрузки на валу электродвигателя по показаниям амперметра (способ амперметра). Сущность этого мето-

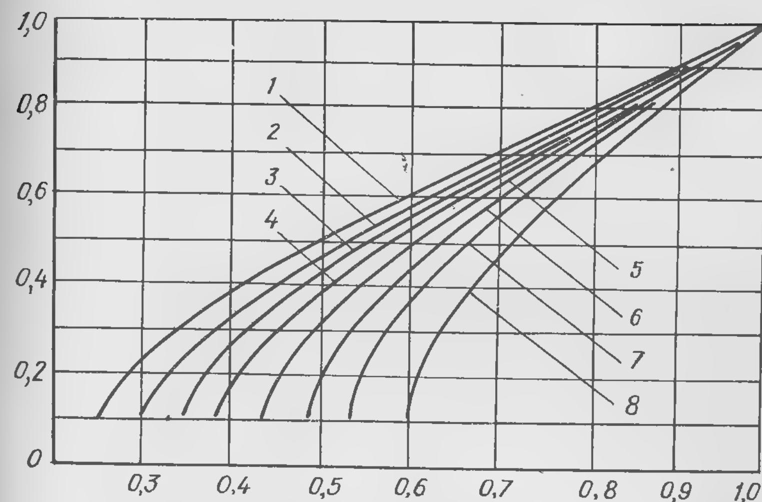


Рис. 13. Кривые для определения среднего и среднеквадратичного (эквивалентного) коэффициентов нагрузки асинхронных электродвигателей при различных значениях коэффициентов мощности: *1* — для $\cos\varphi_н=0{,}92$; *2* — 0,89; *3* — 0,86; *4* — 0,83; *5* — 0,79; *6* — 0,76; *7* — 0,73; *8* — 0,69; по вертикальной оси откладываются значения $к_{нг}=P/P_н$; по горизонтальной — значения $k_i=I_{ср}/I_н$ или $k_i=I_э/I_н$

да сводится к определению в условиях нормального режима среднего расчетного $I_{ср}$ или эквивалентного (среднеквадратичного $I_{ск}$) тока нагрузки. Затем, зная номинальные значения тока и коэффициента мощности электродвигателя, по кривым рис. 13 можно определить коэффициент нагрузки и далее мощность на валу электродвигателя:

$$P = k_{нг} P_н.$$

Кривые охватывают практически весь диапазон номинальных коэффициентов мощности. Если величина коэффициента у проверяемого электродвигателя не совпадает ни с одним из значений $\cos\varphi_н$, то коэффициент нагрузки данного электродвигателя подбирают в промежуточном поле между двумя наиболее близкими кривыми на рис. 13.

При снятии графиков нагрузки с помощью амперметра необходимо проверять напряжение сети, и если ток замеряется при напряжении, отличном от номиналь-

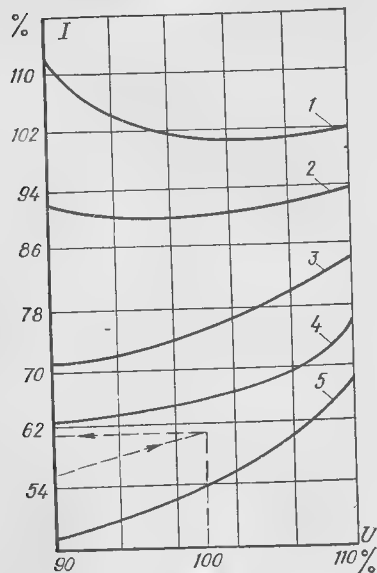


Рис. 14. Кривые для приведения относительного тока к номинальному напряжению:

1 — относительный ток $I100/I_н=100$ % при $U=U_н$; 2 — то же 90 % при $U=U_н$; 3 — то же 75 % при $U=U_н$; 4 — то же 65 % при $U=U_н$; 5 — то же 55 % при $U=U_н$

ного, то в расчеты следует внести соответствующую поправку (рис. 14).

Рассмотрим примеры определения коэффициента нагрузки и мощности на валу электродвигателя для типовых нагрузочных графиков производственных машин.

Пример. Асинхронный электродвигатель серии 4АН160S4У3; $P_н = 18{,}5$ кВт; $U_н = 380$ В; $I_н = 36{,}5$ А; $\cos\varphi_н = 0{,}87$ приводит в движение центробежный вентилятор. Определить коэффициент нагрузки и мощность на валу электродвигателя для заданных условий работы.

Так как режим работы центробежного вентилятора характеризуется неизменной производительностью, то расчетный ток $I_{ср}$ может быть определен по одному-двум замерам тока статора. Допустим, этот ток равен 21 А при напряжении 342 В.

Относительный нагрузочный ток составляет $20/36{,}5 \cdot 100 = 56$ % при относительном напряжении $342/380 \cdot 100 = 90$ %. Приведем полученное значение тока к 100 % напряжения, пользуясь кривыми рис. 14 (показано пунктиром). Приведенный относительный ток равен приблизительно 60 %, т. е. $k_i = I_{ср}/I_н = 60$ %.

Тогда в промежуточном поле между кривыми 2 и 3 (для $\cos\varphi_н = 0{,}87$) находим для $k_i = 0{,}6$ коэффициент нагрузки $k_{нг} = 0{,}55$. Следовательно, мощность на валу электродвигателя

$$P = k_{нг}P_п = 0{,}55 \cdot 18{,}5 = 10{,}2 \text{ кВт}.$$

Пример. Механизм, имеющий цикличный график нагрузки (S1) (рис. 15), приводится в движение асинхронным электродвигателем с повышенным скольжением серии 4АС160S6У3; $P_н = 12$ кВт; $U_н = 380$ В; $I_н = 26$ А; $\cos\varphi_н = 0{,}85$. Определить коэффициент нагрузки электродвигателя при следующих параметрах графика:

$I_1 = 12$ А; $I_2 = 22$ А; $t_1 = 8$ с; $t_2 = 12$ с; $t_ц = t_1 + t_2 = 8 + 12 = 20$ с; $U_н = 380$ В.

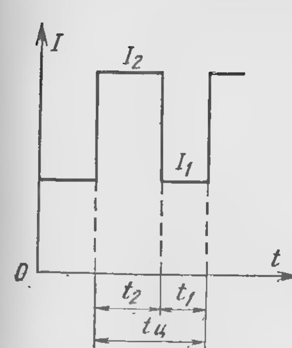


Рис. 15. График нагрузочного тока электродвигателя при продолжительном режиме работы

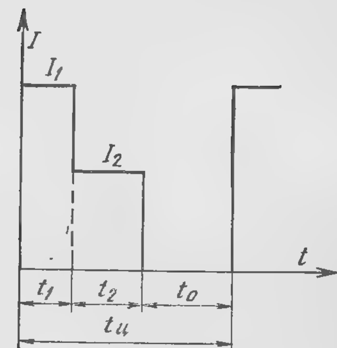


Рис. 16. График нагрузочного тока электродвигателя при продолжительном режиме работы и наличии ограничителя холостого хода

Средний расчетный ток

$$I_{ср} = (I_1t_1 + I_2t_2)/t_ц = (12 \cdot 8 + 22 \cdot 12)/20 = 18 \text{ А}.$$

В промежуточном поле между кривыми 3 и 4 при $k_i = I_{ср}/I_н = 18/26 = 0{,}7$, коэффициент нагрузки $k_{нг} = 0{,}62$. Следовательно, нагрузка на валу электродвигателя $P = k_{нг}P_н = 0{,}62 \cdot 12 = 7{,}44$ кВт.

Пример. Металлорежущий станок, снабженный ограничителем холостого хода, при цикличном графике нагрузки (S3) (рис. 16) приводится в движение асинхронным электродвигателем серии 4А160SУ3; $P_н = 15$ кВт; $U_н = 380$ В; $I_н = 29{,}3$ А; $\cos\varphi_н = 0{,}88$; $n_н = 1465$ об/мин; $S_н = 2{,}62$ %. Определить коэффициент нагрузки электродвигателя при следующих параметрах нагрузочного графика: $I_1 = 22$ А; $I_2 = 15$ А; $t_1 = 10$ с; $t_2 = 20$ с; длительность включения $t_в = t_1 + t_2 = 10 + 20 = 30$ с, паузы $t_0 = 30$ с, цикла $t_ц = t_в + t_0 = 30 + 30 = 60$ с; относительная продолжительность включения $\varepsilon = t_в/t_ц = 30/60 = 0{,}5$; число включений в час $z = 3600/t_ц = 3600/60 = 60$.

Средний расчетный ток нагрузки электродвигателя, автоматически отключаемого на период паузы, определяется из выражения:

$$I_{ср} \doteq \frac{I_1t_1 + I_2t_2}{(t_1 + t_2)\alpha_р} = \frac{22 \cdot 10 + 15 \cdot 20}{(10 + 20) \cdot 1{,}05} = 16{,}5 \text{ А},$$

где $\alpha_р$ — коэффициент, зависящий от числа включений в час z, номинального скольжения $s_н$ и относительной продолжительности включения ε, определяется по кривым рис. 17.

В данном случае для $\varepsilon = 0{,}5$ и $z/s_н\ \% = 60/2{,}62 = 23$ коэффициент $\alpha_р = 1{,}05$.

Затем в промежуточном поле между кривыми 2 и 3 на рис. 13 (для $\cos\varphi_н = 0{,}88$) находим, что при $k_i = I_{ср}/I_н = 16{,}5/29{,}3 = 0{,}56$

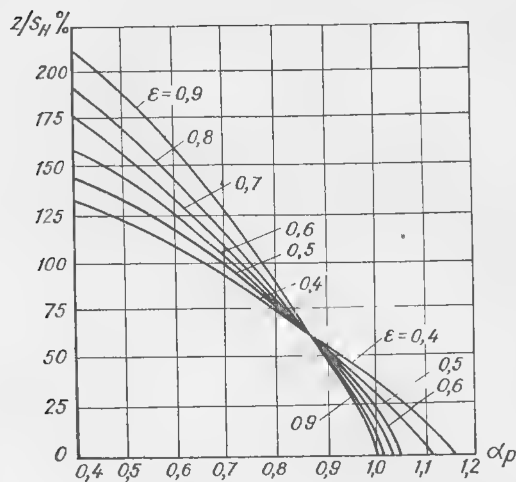


Рис. 17. Кривые $z/s_н$% при различных значениях относительной продолжительности включения

средний коэффициент нагрузки $k_{нг} = 0{,}45$. Следовательно, средняя нагрузка на валу электродвигателя $P = k_{нг}P_н = 0{,}45 \cdot 15 = 7$ кВт.

Пример. Универсальный токарный станок, работающий в продолжительном режиме с переменной нагрузкой (S1), приводится в движение асинхронным электродвигателем 4АН180S4У3; $P_н = 30$ кВт; $U_н = 380$ В; $I_н = 60{,}3$ А; $\cos\varphi_н = 0{,}84$; $n_н = 1465$ об/мин. Определить коэффициент нагрузки и мощность на валу электродвигателя.

В связи с переменным характером нагрузки необходимо построить часовой график нагрузочного тока.

Средний расчетный ток нагрузки электродвигателя определяется на основе расчетного графика, перестроенного соответственно пунктирной линии на рис. 18, из выражения:

$$I_{ср} = \frac{I_1 + I_2 + \ldots + I_{12}}{12} =$$

$$= \frac{25+40+50+35+38+50+50+35+20+25+35+60}{12} = 39 \text{ А}.$$

Определив $k_i = I_{ср}/I_н = 39/60{,}3 = 0{,}65$, находим в промежуточном поле между кривыми *3* и *4* на рис. 13 (для $\cos\varphi_н = 0{,}84$) коэффициент нагрузки электродвигателя $k_{нг} = 0{,}64$. Следовательно, нагрузка на валу электродвигателя $P = k_{нг}P_н = 0{,}64 \cdot 30 = 19$ кВт.

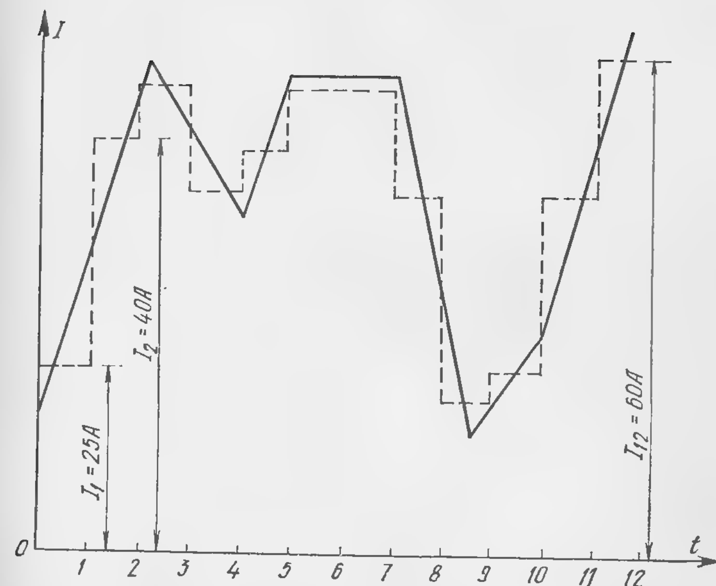


Рис. 18. График нагрузочного тока электродвигателя универсального токарного станка

Определение оптимального коэффициента нагрузки асинхронного электродвигателя

Для определения фактического коэффициента нагрузки электродвигателя нужно знать оптимальную его величину. Если при этом исходить из потерь активной мощности в самом электродвигателе, то наивыгоднейший режим его работы будет при такой нагрузке, при которой постоянные потери равны переменным, т. е.

$$\Delta p_x = k^2_{нг}\Delta p_{нг.н}.$$

Отсюда оптимальный коэффициент нагрузки с учетом потерь в электродвигателе составит:

$$k'_{нг.опт} = \sqrt{\Delta p_x/\Delta p_{нг.н}}. \qquad (32)$$

Практически он находится в диапазоне нагрузок 0,65—0,75 от номинальной.

Полученный из выражения (32) коэффициент нагрузки не учитывает потери активной мощности в сети, вы-

званные потребляемой асинхронным электродвигателем реактивной мощностью. Эти потери принято учитывать с помощью экономического эквивалента реактивной мощности, называемого также коэффициентом изменения потерь. Исходя из этого, оптимальный с энергетической точки зрения коэффициент нагрузки асинхронного электродвигателя

$$k_{\text{нг.опт}} = \sqrt{\frac{\Delta p_x + k_э Q_x}{\Delta p_{\text{нг.н}} + k_э \Delta Q_н}}, \qquad (33)$$

где $k_э$ — экономический эквивалент реактивной мощности, кВт/квар; $Q_x = \sqrt{3}\, U_н I_x 10^{-3}$ — реактивная мощность холостого хода электродвигателя (намагничивающая мощность), квар; I_x — ток холостого хода электродвигателя (намагничивающий ток), А; $\Delta Q_н = Q_н - Q_x$ — прирост потребления реактивной мощности при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной, квар; $Q_н = P_н \operatorname{tg} \varphi_н / \eta_н$ — реактивная мощность, потребляемая электродвигателем при номинальной нагрузке, квар; $\operatorname{tg} \varphi_н$ — тангенс угла сдвига фаз, соответствующий $\cos \varphi_н$.

Анализ выражения (33) показывает, что оптимальный коэффициент нагрузки при прочих равных условиях тем больше, чем больше реактивная мощность холостого хода и экономический эквивалент. Если исходить из средних значений $k_э$ (порядка 0,06—0,09 кВт/квар), то для электродвигателей серии 4А $k_{\text{нг.опт}}$ выразится величиной порядка 0,8—0,9.

Для расчета по формуле (33) необходимо иметь номинальное значение реактивной мощности холостого хода $Q_х$. Эти данные в каталогах не приводятся. При наличии значений КПД и коэффициента мощности в функции коэффициента нагрузки (например, для серии 4А) величина $Q_х$ применительно к конкретному типу серийного электродвигателя может быть определена по формуле:

$$Q_x = (Q - k^2_{\text{нг}} Q_н)/(1 - k^2_{\text{нг}}), \qquad (34)$$

где Q — реактивная мощность асинхронного электродвигателя при частичной нагрузке (данном $k_{\text{нг}}$);

$$Q = k_{\text{нг}} P_н \operatorname{tg} \varphi / \eta, \qquad (35)$$

где η — КПД электродвигателя при данном $k_{\text{нг}}$; $\operatorname{tg} \varphi$ — тангенс угла сдвига фаз, соответствующий коэффициенту мощности при данном $k_{\text{нг}}$.

Реактивная мощность холостого хода асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, для которых известны только $P_н$, $\eta_н$, $\cos \varphi_н$, может быть определена по формуле:

$$Q_х = P_н m / \eta_н, \qquad (36)$$

где m — расчетный параметр, определяемый при помощи графика на рис. 19.

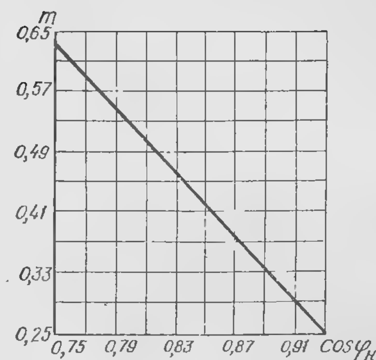


Рис. 19. Зависимость расчетного параметра m от номинального коэффициента мощности асинхронного электродвигателя

Пример. Определить оптимальный коэффициент нагрузки асинхронного электродвигателя серии 4А100S2У3; $P_н = 4$ кВт; $U_н = 380$ В; $I_н = 7{,}8$ А; $\eta_н = 86{,}5$ %; $\cos \varphi_н = 0{,}89$, работающего с нагрузкой 2 кВт. Экономический эквивалент реактивной мощности в данном пункте энергосистемы $k_э = 0{,}15$ кВт/квар. Значения КПД и $\cos \varphi$ при частичных нагрузках

$k_{\text{нг}}$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
η %	80	86	87	86,5	85
$\cos \varphi$	0,6	0,8	0,86	0,89	0,90

Фактический коэффициент нагрузки

$k_{\text{нг}} = P/P_н = 2/4 = 0{,}5;$

$Q_н = P_н \operatorname{tg} \varphi_н / \eta_н = 4 \cdot 0{,}511/0{,}865 = 2{,}36$ квар;

$Q = k_{\text{нг}} P_н \operatorname{tg} \varphi / \eta = 0{,}5 \cdot 4 \cdot 0{,}75/0{,}8 = 1{,}74$ квар;

$Q_х = (Q - k^2_{\text{нг}} Q_н)/(1 - k^2_{\text{нг}}) = (1{,}74 - 0{,}5^2 \cdot 2{,}36)/(1 - 0{,}5^2) = 1{,}53$ квар;

$\Delta p_н = P_н/\eta_н - P_н = 4/0{,}865 - 4 = 0{,}62$ кВт;

$\Delta p = k_{\text{нг}} P_н/\eta - k_{\text{нг}} P_н = 0{,}5 \cdot 4/0{,}86 - 0{,}5 \cdot 4 = 0{,}3$ кВт;

$\Delta p_х = (\Delta p - k^2_{\text{нг}} \Delta p_н)/(1 - k^2_{\text{нг}}) = (0{,}3 - 0{,}5^2 \cdot 0{,}62)/(1 - 0{,}5^2) = 0{,}19$ кВт;

$\Delta p_{\text{нг.н}} = \Delta p_н - \Delta p_х = 0{,}62 - 0{,}19 = 0{,}43$ кВт.

Наивыгоднейший коэффициент нагрузки с учетом потерь активной мощности только в самом электродвигателе

$$k'_{\text{нг.опт}} = \sqrt{\Delta p_x / \Delta p_{\text{нг.н}}} = \sqrt{0{,}19/0{,}43} = 0{,}7.$$

Оптимальный с чисто энергетической точки зрения коэффициент нагрузки

$$k_{\text{нг.опт}} = \sqrt{\frac{\Delta p_x + k_э Q_x}{\Delta p_{\text{нг.н}} + k_э (Q_н - Q_x)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0{,}19 + 0{,}15 \cdot 1{,}53}{0{,}43 + 0{,}15 (2{,}36 - 1{,}53)}} = \sqrt{0{,}75} = 0{,}87.$$

Таким образом, расчеты показывают, что если не учитывать влияния потребляемой реактивной мощности на величину суммарных потерь активной мощности, т. е. если $k_э = 0$ (что было бы неправильным), то оптимальные коэффициенты нагрузки окажутся намного заниженными. В нашем случае расхождение составляет $(0{,}87 - 0{,}7) \cdot 100/0{,}87 = 20\ \%$.

Подбор номинальной мощности для замены незагруженного асинхронного электродвигателя

Замена незагруженного электродвигателя другим, меньшей мощности, должна быть рентабельной, т. е. способствовать уменьшению суммарных потерь активной мощности в энергосистеме (в электродвигателе и электросетях). Иначе говоря, если при замене незагруженного электродвигателя суммарные потери активной мощности не увеличиваются, а реактивная мощность уменьшается, то такая замена будет рентабельной. При этом предполагается, что заменяемый электродвигатель (большой мощности) может быть использован в другом месте.

Согласно действующим положениям, асинхронные электродвигатели, средняя нагрузка которых не превышает 45 % их номинальной мощности, подлежат замене электродвигателями меньшей мощности. При нагрузках более 70 % номинальной мощности замена их нецелесообразна.

При нагрузке электродвигателей в пределах 45—70 % номинальной мощности их замена должна быть подтверждена уменьшением суммарных потерь, определяемых по формуле:

$$\Delta p_{\text{сум}} = [Q_x(1 - k^2_{\text{нг}}) + k^2_{\text{нг}} Q_н] k_э + \Delta p_x + k^2_{\text{нг}} \Delta p_{\text{нг.н}}, \quad (37)$$

где $k_э$ принимается по табл. 4.

Условие целесообразности изъятия избыточной мощности может быть представлено выражением:

$$\Delta p_{\text{сум1}} - \Delta p_{\text{сум2}} > 0,$$

где $\Delta p_{\text{сум1}}$ — суммарные потери активной мощности у заменяемого электродвигателя при существующей нагрузке; $\Delta p_{\text{сум2}}$ — соответственно суммарные потери у заменяющего электродвигателя при той же нагрузке.

4. Значения коэффициента изменения потерь

Характеристика трансформаторов и систем электроснабжения	$k_э$, кВт/квар	
	в часы максимума энергосистемы	в часы минимума энергосистемы
Трансформаторы, питающиеся непосредственно от шин электростанций	0,02	0,02
Сетевые трансформаторы, питающиеся от электростанций на генераторном напряжении	0,07	0,04
Понижающие трансформаторы, питающиеся от районных сетей:		
110/35/10 кВ	0,10	0,05
10/6/0,4 кВ	0,15	0,10

В общем случае при подборе электродвигателя меньшей мощности кроме рентабельности должны быть учтены следующие условия:

допустимый нагрев электродвигателя (с учетом конкретного нагрузочного графика);

достаточность пускового момента у заменяющего электродвигателя (для электродвигателей, пускаемых под нагрузкой);

устойчивая работа, определяемая отношением максимального вращающего момента у заменяющего электродвигателя к максимуму момента сопротивления, создаваемому рабочей машиной на валу приводного электродвигателя.

Условие допустимого нагрева выражается соотношением: $P_н > P_э$, где $P_э$ — эквивалентная или среднеквадратичная мощность нагрузки, кВт.

Зная средний ток нагрузки $I_{ср}$, можно найти эквивалентный или среднеквадратичный ток, так как $I_э = \gamma I_{ср}$, где γ — коэффициент, зависящий от графика нагрузки; при продолжительном режиме с неизменной нагрузкой $\gamma = 1$, при переменной нагрузке $\gamma = 1{,}03$—$1{,}05$.

Найдя для заменяемого электродвигателя соотношение $I_э/I_н = k_{iск}$, можно по соответствующей кривой на рис. 13 определить величину $k_{нг} = P/P_н$, а затем найти величину среднеквадратичной мощности нагрузки $P_{ск}$.

Проверка на устойчивость работы не требуется в тех случаях, когда среднеквадратичная нагрузка $P_{ск} \geqslant 0{,}6P_н$, а максимальный ток нагрузки меньше или равен $I_н$, где $P_н$ и $I_н$ — номинальная мощность и номинальный ток заменяемого электродвигателя.

Если же при $P_{ск} > 0{,}6P_н$ наибольший ток нагрузки у заменяемого электродвигателя больше его номинального тока или если $P_{ск} < 0{,}6P_н$, то следует проверить заменяющий электродвигатель на устойчивость работы:

$$1{,}8k_{макс}P_{н1}/P_{н2} \leqslant \lambda,$$

где 1,8 — коэффициент, принимаемый с учетом возможных колебаний напряжения сети; $k_{макс} = P_{макс}/P_{н1}$ — максимальный коэффициент нагрузки заменяемого электродвигателя; если максимальный ток нагрузки больше номинального, то коэффициент $k_{макс}$ может быть приблизительно принят равным отношению $I_{макс}/I_н$; $P_{н1}$ и $P_{н2}$ — номинальные мощности соответственно заменяемого и заменяющего электродвигателей.

Проверку по пусковым условиям не требуется выполнять в отношении тех производственных механизмов, электродвигатели которых запускаются вхолостую (например, металлорежущих и деревообделочных станков) или у которых момент сопротивления на валу электродвигателя резко падает при уменьшении угловой скорости, например у рабочих машин с вентиляторным моментом (центробежных насосов, вентиляторов и т. п.), так как длительность разгона в этих случаях, как правило, не выходит за пределы допускаемых (2,5—3 с).

У тех машин, у которых момент сопротивления на валу электродвигателя не зависит (или почти не зависит) от угловой скорости (например, у поршневых компрессоров и насосов, грузоподъемных механизмов и т. п.), или у машин с относительно тяжелыми условиями пуска вследствие наличия сравнительно больших инерционных масс (например, молоты, прессы, ковочные машины) необходимо перед изъятием избыточной мощности электродвигателя проверить ожидаемую длительность разгона.

Допустимая длительность разгона системы электропривода с короткозамкнутым электродвигателем, защищаемым плавкими вставками, ограничивается 2,5—3 с во избежание перегорания плавких вставок.

Ожидаемая длительность разгона (с)

$$t_{разг} = \frac{T_м\sigma}{0{,}45[(k_{пуск} - k_{нг}) + (\lambda - k_{нг})]}, \qquad (38)$$

где $T_м = J_д\omega_0^2 10^{-3}/P_н$ — постоянная времени пуска электродвигателя, с; ω_0 — синхронная угловая скорость электродвигателя, рад/с; $\sigma = J_\Sigma/J_д = 1 + (J_{мех}/J_д i^2)$ — коэффициент, учитывающий наличие инерционных масс систем электропривода; $J_д$, $J_{мех}$ — моменты инерции соответственно электродвигателя и механизма, кг · м²; i — передаточное отношение; $k_{пуск}$, λ — соответственно кратность пускового и максимального моментов электродвигателя, указываемая в каталоге; $k_{нг}$ — коэффициент нагрузки электродвигателя при его пуске.

Величина $T_м\sigma$ может быть определена по кривой выбега.

Для серийных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей в справочной литературе* приводятся данные времени пуска их вхолостую $t_{п.о}$.

При помощи значения $t_{п.о}$ можно определить ожидаемую длительность разгона электродвигателя (с) под нагрузкой:

$$t_{разг} = t_{п.о}\frac{J_\Sigma}{J_д}\cdot\frac{M_{пуск.ср}}{M_{пуск.ср} - M_с} = t_{п.о}\sigma\frac{M_{пуск.ср}}{M_{пуск.ср} - M_с}, \qquad (39)$$

где $M_{пуск.ср} = (M_{пуск} + M_{макс})/2$ — средний пусковой момент, Н · м; $M_с = P \cdot 10^3/\omega_с$ — момент статической нагрузки, Н · м; $\omega_с$ — угловая скорость электродвигателя, соответствующая моменту статической нагрузки, рад/с.

Пример. В пункте энергосистемы, где коэффициент изменения потерь $k_э = 0{,}1$ кВт/квар, эксплуатируется асинхронный короткозамкнутый электродвигатель серии 4А160S4У3; $P_н = 15$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 1445$ об/мин; $I_н = 29{,}3$ А; $\eta_н = 88{,}5$ %; $\cos\varphi_н = 0{,}88$, работающий с нагрузкой на валу $P = 7{,}5$ кВт.

---

* Асинхронные электродвигатели серии 4А. М., 1982.

Дополнительные величины электродвигателя, полученные расчетным путем по данным каталога (значений η и $\cos\varphi$ при частичных нагрузках), следующие: $Q_x = 6$ квар; $Q_н = 9,7$ квар; $\Delta p_x = 0,54$ кВт; $\Delta p_н = 2$ кВт; $\Delta p_{нг.н} = 1,46$ кВт.

Пуск электродвигателя осуществляется под нагрузкой.

Фактический коэффициент нагрузки электродвигателя $k_{нг} = 7,5/15 = 0,5$, оптимальный коэффициент нагрузки

$$k_{нг.опт} = \sqrt{\frac{\Delta p_x + k_э Q_x}{\Delta p_{нг.н} + k_э(Q_н - Q_x)}} = \sqrt{\frac{0,54 + 0,1\cdot 6}{1,46 + 0,1(9,7 - 6)}} \approx 1.$$

Так как загрузка электродвигателя до оптимального коэффициента нагрузки не предполагается, было решено заменить его электродвигателем меньшей мощности. При этом рассмотрены два варианта:

замена электродвигателем серии 4А132М4У3; $P_н = 11$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 1460$ об/мин; $I_н = 22$ А; $\eta_н = 87,5$ %; $\cos\varphi_н = 0,87$; $Q_x = 5$ квар; $Q_н = 10,3$ квар; $\Delta p_x = 0,23$ кВт; $\Delta p_н = 1,5$ кВт; $\Delta p_{нг.н} = 1,3$ кВт;

замена электродвигателем серии 4А132S4У3; $P_н = 7,5$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 1455$ об/мин; $I_н = 11,1$ А; $\eta_н = 87,5$ %; $\cos\varphi_н = 0,86$; $Q_x = 3,4$ квар; $\Delta p_x = 0,32$ кВт; $\Delta p_н = 1$ кВт; $\Delta p_{нг.н} = 0,68$ кВт; $Q_н = 5$ квар.

Суммарные потери активной мощности в энергосистеме, обусловленные работой электродвигателя $P_н = 15$ кВт при $k_{нг} = 0,5$, определяются равенством:

$$\Delta p_{сум} = [Q_x(1 - k^2_{нг}) + k^2_{нг} Q_н] k_э + \Delta p_x + k^2_{нг} \Delta p_{нг.н} =$$
$$= [6(1 - 0,5^2) + 0,5^2 \cdot 9,7]0,1 + 0,54 + 0,5^2 \cdot 1,46 = 1,59 \text{ кВт}.$$

Аналогично определяются потери активной мощности в энергосистеме $\Delta p_{сум1}$ при работе электродвигателя $P_н = 11$ кВт с $k_{нг} = 7,5/11 = 0,67$ и потери $\Delta p_{сум2}$ при работе электродвигателя $P_н = 7,5$ кВт с $k_{нг} = 7,5/7,5 = 1$:

$$\Delta p_{сум1} = [4,7(1 - 0,67^2) + 0,67^2 \cdot 7,2]0,1 + 0,23 + 0,67^2 \cdot 1,27 = 1,37 \text{ кВт};$$

$$\Delta p_{сум2} = [3,5 + (5,3 - 3,5)]0,1 + 0,32 + 0,78 = 1,63 \text{ кВт}.$$

Таким образом, условию рентабельности удовлетворяет первый вариант, так как при замене электродвигателем $P_н = 11$ кВт снижение суммарных потерь активной мощности составляет $(1,59 - 1,37)/1,59 = 0,14$, или 14 %.

По условию допустимого нагрева заменяющий электродвигатель подходит, так как его номинальная мощность $P_н = 11$ кВт больше эквивалентной нагрузки $P_э = P_{ск} = 7,5$ кВт.

По условию перегрузки (устойчивости) в данном случае проверки не требуется, так как $P_э = 7,5$ кВт $> 0,6P_н = 0,6 \cdot 11 = 6,6$ кВт.

Ожидаемая длительность разгона при $k_{нг} = 0,67$; $k_{пуск} = 2,2$; $\lambda = 3$; $J_д = 0,16$ кг·м²; $\sigma = 2$ (по расчету); $T_м = J_д \omega_0^2 10^{-3}/P_н = 0,16 \cdot 150^2 \cdot 10^{-3}/11 = 0,33$ с, составляет

$$t_{разг} = \frac{T_м \sigma}{0,45[(k_{пуск} - k_{нг}) + (\lambda - k_{нг})]} = \frac{0,33 \cdot 2}{0,45[(2,2 - 0,67) + (3 - 0,67)]} \approx 0,18 \text{ с},$$

т. е. допустимую величину.

Примерно аналогичный результат можно получить по формуле (37).

Предварительно находим

$M_н = P_н 10^3/\omega_н = 11 \cdot 10^3/145 = 76$ Н · м.

Пусковой момент

$M_{пуск} = k_{пуск} M_н = 2,2 \cdot 76 = 166$ Н · м.

Максимальный момент

$M_{макс} = \lambda M_н = 3 \cdot 76 = 228$ Н · м.

Средний пусковой момент

$M_{пуск.ср} = (M_{пуск} + M_{макс})/2 = (166 + 228)/2 = 200$ Н · м.

Момент статической нагрузки

$M_с = P \cdot 10^3/\omega_с = 7,5 \cdot 10^3/145 = 52$ Н · м.

Время пуска вхолостую (по данным упоминаемого выше справочника) $t_{п.о} = 0,07$ с.

Ожидаемое время разгона при пуске под нагрузкой

$$t_{разг} = t_{п.о}\sigma \frac{M_{пуск.ср}}{M_{пуск.ср} - M_с} = 0,07 \cdot 2 \cdot \frac{200}{200 - 52} = 0,19 \text{ с}.$$

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЖАРООПАСНЫХ И ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

Пожароопасные и взрывоопасные смеси

На промышленных предприятиях в процессе производства используют, перерабатывают или получают жидкие, газообразные и твердые горючие вещества, которые

СОДЕРЖАНИЕ

Общие задачи выбора электродвигателя 3
Номинальные данные электродвигателей 3
Основные конструктивные исполнения электродвигателей . . 5
Основные серии и типоразмеры электродвигателей 9
Расчет мощности электродвигателей 16
Общие положения 16
Потери активной мощности в электродвигателе 19
Нагрев и охлаждение электродвигателя 23
Основные конструктивные факторы, влияющие на мощность электродвигателя 26
Номинальные режимы работы электродвигателей . . . 28
Нагрузочные диаграммы 30
Расчет мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы (S1) 33
Расчет мощности электродвигателя при повторно-кратковременном (S3) и кратковременном (S2) режимах работы 45
Выбор конструктивного типа электродвигателя и его номинальной угловой скорости 51
Выбор рода тока и типа электродвигателя 52
Определение мощности на валу асинхронного электродвигателя опытным путем 54
Определение фактического коэффициента нагрузки асинхронного электродвигателя 54
Определение оптимального коэффициента нагрузки асинхронного электродвигателя 59
Подбор номинальной мощности для замены незагруженного асинхронного электродвигателя 62
Выбор электродвигателей для пожароопасных и взрывоопасных зон промышленных установок 67
Пожароопасные и взрывоопасные смеси 67
Пожароопасные зоны и их классификация 70
Взрывоопасные зоны и их классификация 71
Уровни и виды взрывозащиты 74
Выбор электродвигателей для пожароопасных и взрывоопасных зон 76

Борис Владимирович Кузнецов

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ МЕХАНИЗМАМ

Заведующий редакцией Д. В. Василенко. Редактор Л. Б. Ванчук. Художник В. Л. Милевский. Художественный редактор А. И. Инкин. Технический редактор Л. Л. Грамович. Корректоры Г. И. Славинская, Г. Б. Красовская.

ИБ № 2258

Сдано в набор 24.02.84. Подп. в печать 05.07.84. АТ 22615. Формат 84×108 1/32. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 4,20. Усл. кр.-отт. 4,62. Уч.-изд. л. 4,06. Тираж 6500 экз. Зак. 818. Цена 25 к.

Ордена Дружбы народов издательство «Беларусь» Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220600, Минск, проспект Машерова, 11.

Ордена Трудового Красного Знамени типография издательства ЦК КП Белоруссии. 220041, Минск, Ленинский проспект, 79.